



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

STUDIE VTOKOVÝCH VÍRŮ

STUDY OF IN-TAKE VORTICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Burda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Hudec

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Radim Burda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Hudec**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studie vtokových vírů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodní víry se vyskytují hlavně při výtoku otvorem ve dně nebo ve stěnách nádrží. Souhrnně se nazývají vtokové víry. Podle formy, kterou nabývají, je můžeme rozdělit do čtyř hlavních kategorií. Při modelovém výzkumu vtoků vodních elektráren jde zpravidla o dostatečně spolehlivé stanovení podmínek, za kterých nedochází k strhávání vzduchu vírem do vtoku.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat literární rešerši mapující stávající poznání v oblasti vtokových vírů. Navrhnout experiment pro pozorování a měření vtokových vírů se zaměřením na poslední stádium se vzduchovým jádrem a porovnat naměřená data s dostupnými výsledky jiných autorů.

Seznam doporučené literatury:

Lught, Hans J.: Vortex Flow in Nature and Technology. United States of America, Wiley & Sons, 1983. 297 s. ISBN 0-471-86925-2.

Funakil, J., Neya, M., Hattori, M., Tanigawa, H., Hirata, K.: Flow measurement in a suction sump by UVP. Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 1, 2008, s. 68-79

Rajendran, V.P., Patel. V.C.: Experiments on flow in a model water-pump intake sump to validate a numerical model. Proceedings of FEDSM'98, 1998, Washington, s. 10

Rohan, K.: Lievikový vír vo vodnom staviteľstve, SAV 1967

Lískovec, L.: Studie vtoku tlakového výpustného potrubí údolních přehrad, Vědecko-technické nakladatelství, Praha 1950

Chrapan, J.: Stacionární průdové pole vazkej nestlačiteľnej tekutiny v okolí hyperbolického vírového noru s kruhovým jádrom, Vodohospodářský časopis 1964

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Anotace

Následující bakalářská práce se zabývá vírovým prouděním, konkrétně vtokovými víry s důrazem na úplné nálevkovité víry vyskytující se v jednoduchých sacích jímkách s vertikálně umístěným potrubím. Práce je rozdělená do dvou částí. V části teoretické byla sestavena literární rešerše mapující oblast vtokových vírů za posledních přibližně 60 let. V praktické části jsou poté, na zařízení sestaveném v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana, ověřovány doporučené závislosti vzniku úplného nálevkovitého víru se vzduchovým jádrem na hloubce zanoření potrubí a velikosti průtoku.

Klíčová slova

Vírové proudění, vtokový vír, modelová podobnost, kritická hloubka ponoru

Annotation

This bachelor thesis deals with vortex flow, in particular intake-vortices formations with emphasis on intake-vortices with full air core which appear near vertical intakes. The thesis is divided into two parts. The first part contains theoretical research on the intake-vortices and maps development of this field during the last 60 years. The goal of the experimental part is to verify recommended dependence of the formation of intake-vortices with full air core on submerge of intake and volumetric flow rate. The experiment was conducted in the laboratory of the fluid engineering department of Viktor Kaplan.

Key Words

Vortex flow, intake-vortices, model conformity, critical submerge

Bibliografická citace

BURDA, R. *Studie vtokových vírů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Hudec.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Hudce a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Brně dne

.....

Radim BURDA

Poděkování

Děkuji Ing. Martinu Hudcovi za cenné rady, připomínky a vedení při tvorbě bakalářské práce. Dále za pomoc v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana při experimentálním měření.

Dále bych rád poděkoval své rodině za materiální a psychickou podporu po celou dobu studia na vysoké škole a Yvetě Jarošíkové za morální podporu a pravopisnou korekturu.

Obsah

1. ÚVOD	10
2. KINEMATIKA KAPALIN.....	11
2.1 PROUDNICE A PROUDOVÁ TRUBICE	11
2.2 ROVNICE KONTINUITY V SYSTÉMU S VOLNOU HLADINOU	11
2.3 POHYBOVÁ ROVNICE KAPALIN	12
3. VTOKOVÉ VÍRY	13
3.1 DEFINICE VÍROVÉHO POHYBU	14
3.2 RYCHLOSTI VE VTOKOVÝCH VÍRECH.....	14
3.2.1 Model tuhého tělesa.....	15
3.2.2 Potenciální vír	15
3.2.3 Rankinův model	15
3.2.4 Lambův model	16
3.3 MECHANISMY VZNIKU VTOKOVÉHO VÍRU	17
3.4 KLASIFIKACE VTOKOVÝCH VÍRŮ.....	18
3.5 KRITICKÁ HLOUBKA PONORU.....	21
3.6 NEGATIVNÍ VLIV VTOKOVÝCH VÍRŮ.....	23
4. MECHANICKÁ PODOBNOST V HYDRAULICE	24
4.1 ZÁKONY MODELOVÉ PODOBNOSTI	24
4.2 MODELOVÁ PODOBNOST PŘI VZNIKU VÍRŮ VE VTOKOVÝCH OBJEKTECH.....	26
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	27
5.2 POSTUP MĚŘENÍ	28
5.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	29
5.3.1 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 22 \text{ l/s}$	31
5.3.2 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 18 \text{ l/s}$	32
5.3.3 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 14 \text{ l/s}$	32
5.3.4 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 10 \text{ l/s}$	33
5.4 SROVNÁNÍ S OSTATNÍMI AUTORY	34
6. ZÁVĚR.....	36

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM TABULEK	42

1. Úvod

Vírové proudění patří k základním způsobům přenosu energie v přírodě a můžeme jej pozorovat téměř na každém kroku, přičemž k nejvýraznějším příkladům v přírodě patří hurikány či tornáda. Velký význam má však i v technickém prostředí, zejména u hydraulických strojů, kde může mít markantní negativní vliv. Jedním z příkladů vírového proudění v technickém prostředí jsou i vtokové víry, které ve stádiu úplného nálevkovité víru se vzduchovým jádrem strhávají vzduch do vtoku, čímž významně ohrožují fungování hydraulického stroje. Přívod vzduchu snižuje účinnost čerpadla či turbíny, snižuje průtokovou kapacitu, zvyšuje tvorbu koroze, zvyšuje intenzitu hluku, zapříčiňuje vznik kavitace a podobně.

Vírový pohyb je velmi podstatnou a dosud neprobádanou oblastí lidského poznání, přičemž v posledních letech dochází s rozvojem výpočetní techniky k opětovnému obnovení zájmu o tuto oblast. Tato práce má za cíl dále prohloubit poznatky o vtokových vírech a ověřit výsledky předešlých studií.

V teoretické části jsou stručně shrnuty poznatky v oblasti vírového proudění za posledních přibližně 60 let. Zvýšený důraz je kladen na vtokové víry (převážně úplný nálevkovitý vír se vzduchovým jádrem) v jednoduchých sacích jímkách s vertikálně orientovaným potrubím. Dále jsou shrnuty dosavadní poznatky modelové podobnosti, podle kterých se převádějí výsledky z experimentálních měření na skutečná díla.

V experimentální části jsou poté ověřovány odvozené závislosti jednotlivých autorů pro kritickou hloubku ponoru. Na zařízení sestrojeném v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana byla zkoumána závislost vzniku úplného nálevkovitého víru se vzduchovým jádrem na velikosti hloubky ponoru a průtoku. Výsledné hodnoty byly poté porovnány se spočtenými teoretickými hodnotami podle jednotlivých autorů.

2. Kinematika kapalin

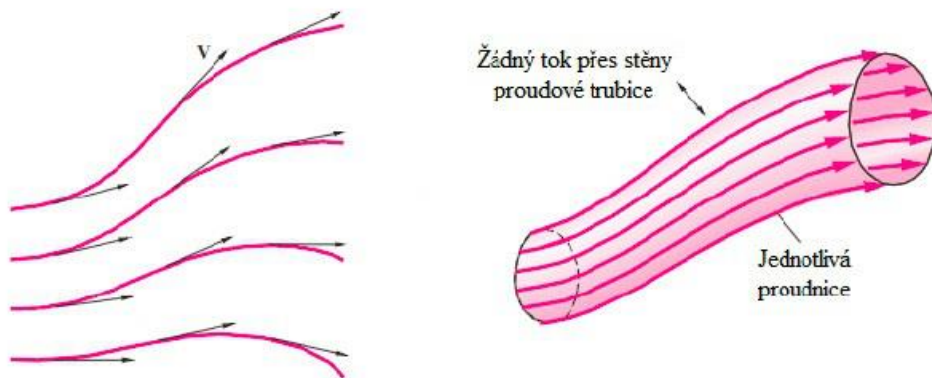
Pohyb tekutin je značně složitější než pohyb tuhých těles, neboť neustále dochází k vzájemnému přemísťování částic. Stejně jako pohyb pevných těles, který je idealizován předpokladem, že se jedná o tuhá tělesa, lze idealizovat i pohyb tekutin, a to např. zanedbáním účinků vnitřního tření či předpokladem, že je kapalina nestlačitelná. Výsledky pro idealizovanou kapalinu můžeme poté aplikovat i na skutečné kapaliny, a to zavedením opravných koeficientů a nahrazením tlaků a rychlostí určitými středními hodnotami. [1]

2.1 Proudnic a proudová trubice

Pohyb tekutin je stanovován vzhledem k soustavě souřadnic. Každá částice tekutiny má vzhledem k soustavě souřadnic v konkrétním místě určitou rychlost. Při vykreslení vektoru rychlosti všech bodů v konkrétním okamžiku dostáváme pole vektoru rychlosti. Vykreslené vektory rychlosti obalují křivky, jejichž tečny v jednotlivých bodech mají směr rychlosti v dotykovém bodě. Tyto křivky nazýváme proudnice (1) a jsou důležité pro popis proudění, protože nedokážeme rozeznat dráhu jedné částice v množství ostatních částic. [1]

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (1)$$

Trubicový útvar, jehož plášť je tvořen proudnicemi, se nazývá proudová trubice – jedná se o všechny proudnice, které procházejí plochou dS uzavřenou křivkou σ . Protože nesmí docházet ke křížení proudnic, pláštěm proudové trubice nemůže protékat žádná kapalina.



Obrázek 1: Zleva proudnice, proudová trubice [2]

2.2 Rovnice kontinuity v systému s volnou hladinou

Při řešení pohybu tekutin v systému s otevřenou hladinou vycházíme z předpokladu kontinuity proudění. Za základní charakteristiku proudění je považována střední rychlost v příslušném profilu, vliv příčných složek rychlosti je zanedbáván.

Za systém uvažujeme koryto s volnou hladinou, kde zkoumaný úsek je ohraničen řezy A-A a B-B, které jsou od sebe ve vzdálenosti dS . Plochou řezu A-A přitéká kapalina o množství Qdt , kde Q je objemový průtok za jednotku času. Plochou řezu B-B za stejnou jednotku času odtéká z vymezené oblasti množství kapaliny, které lze vyjádřit rovnicí

$$\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial S} dS \right) dt \quad (2)$$

Z toho plyne, že ve vymezené oblasti dojde za okamžik dt ke změně objemového množství o

$$-\frac{\partial Q}{\partial S} dS dt. \quad (3)$$

Změna objemového množství ve vymezené oblasti musí vyvolat změnu plochy průtočného průřezu o $\frac{\partial S}{\partial t} dt$, aby byl zachován předpoklad spojitosti kapaliny. Na základě změny plochy průtočného průřezu dojde ke změně objemu ve vymezené oblasti o

$$\frac{\partial S}{\partial t} dt dS. \quad (4)$$

Obě objemové změny si musí být rovny, aby byla zachována kontinuita kapalin. Vykrácením dS a dt vzniká rovnice pro neustálené proudění kapalin v korytech s volnou hladinou, a to ve tvaru [2][3]

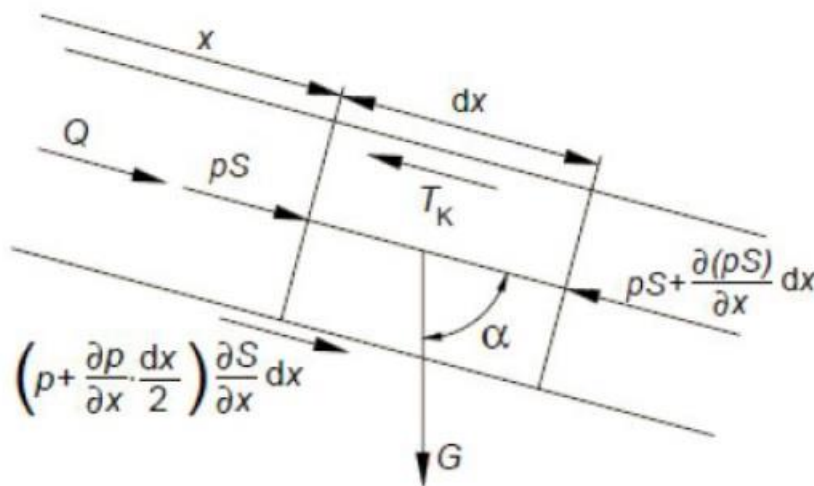
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = 0 \quad (5)$$

2.3 Pohybová rovnice kapalin

Další rovnicí potřebnou pro celkový popis pohybu kapalin je pohybová rovnice kapalin neboli Navier-Stokesova rovnice. Navier-Stokesova rovnice zohledňuje silové poměry uvnitř kapalin. Pro viskózní stlačitelnou kapalinu je odvozena ve tvaru [3]

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} v_j = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\vartheta}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) + \vartheta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (6)$$

kde ϑ je dynamická viskozita [Nsm^{-2}] a g gravitační zrychlení [ms^{-2}].



Obrázek 2: Sily v kapalině [3]

3. Vtokové víry

Vírové proudy jsou velmi rozšířeným jevem. Malé vzdušné víry doprovázejí člověka na každém kroku, při každém došlápnutí vznikají malá oku neviditelná vzdušná proudění. Velké víry, mající dopad na okolí, pak můžeme vidět v atmosféře či oceánech, kdy víry v horních vrstvách atmosféry mohou dosahovat velikostí o průměru až 1000 km, v oceánech až 100 km, s rychlostí dosahující až 100 km/h. Vírové proudění patří k základním způsobům přenosu energie v přírodě. Přehled nejběžnějších v přírodě se vyskytujících vírů lze vidět v tabulce 1.

S vírovým prouděním se ovšem můžeme setkat i v technickém prostředí. Zde může mít pozitivní využití jako např. při odlučování nečistot či v odstředivkách, ale také negativní vliv převážně u hydraulických strojů. Jedním z projevů vírového proudění jsou vtokové víry, které ve svých nejpokročilejších stádiích mohou přivádět do vtoků vzduch či nečistoty z okolí, které značně snižují účinnost turbín či čerpadel. Poznání vírového pohybu při vtokových vírech je momentálně stále neprobádanou oblastí lidského poznání a její výzkum je velmi důležitý, aby bylo možné víry na vtoku omezit, nebo jim, v ideálním případě, úplně předcházet.

Druh víru	Velikost víru (průměr)
Kvantové víry v supratekutém kapalném heliu	10^{-8} cm
Nejmenší turbulentní víry	0,1 cm
Víry vytvářené hmyzem	0,1 – 10 cm
Víry za listy	
Vírové kroužky vznikající při pohybu olivní	
Víření prachu na ulicích	
Vodní víry ve slapových proudech	1 – 10 m
Prašné bouře	
Vírové kroužky při vulkanických erupcích	
Větrné a vodní smršťe	100 – 1000 m
Proudění v mracích	
Víry, které se separují od Golského proudu	
Hurikány	
Fronty nízkého a vysokého tlaku	100 – 2000 km
Cirkulace v oceánech	
Obecná cirkulace v atmosféře	
Proudění v supercelách v atmosféře Země	
Atmosféry planet	5000 – 10^5 km
„Great Red Spot“ Jupiteru (velké červená skvrna)	
Skvrny na Slunci	
Rotace uvnitř hvězd	
Galaxie	Závisí na velikosti hvězdy
	V řádu světelných let

Tabulka 1: Přehled nejběžnějších v přírodě se vyskytujících vírů [4]

3.1 Definice vírového pohybu

Mezi nejpoužívanější definice vírového pohybu patří:

- Víř je rotující pohyb velkého množství hmotných bodů kolem společného středu. [5]
- Víř je koherentní struktura turbulentního rotujícího proudu, která je vytvářena cirkulací proudu. Jinými slovy se jedná o proud, který vykazuje vířivost. [6]

Vířivost [6] je matematický koncept používaný v mechanice tekutin k vyjádření rotace v kapalinách. Jakýkoliv element kapaliny, který rotuje okolo pevného bodu, vykazuje vířivost. Stejně tak je rotující pohyb kapaliny nazýván vířivý pohyb. Z matematického hlediska se jedná o rotaci vektoru rychlosti

$$\vec{\omega} = \text{rot}(\vec{v}) \quad (7)$$

kde $\vec{\omega}$ je vektor vířivosti a \vec{v} vektor rychlosti.

Na základě velikosti vektoru vířivosti je možné rozdělit proudění ideálních kapalin do dvou skupin: [3]

- $\vec{\omega} = 0$ Potenciální proudění – částice nerotují kolem vlastní osy
- $\vec{\omega} \neq 0$ Vířivé proudění – částice rotují kolem vlastní osy

Další veličinou sloužící k definici vírového proudění je **cirkulace**. V mechanice tekutin cirkulace popisuje rotaci proudění a je často používána k určení velikosti otáčení u vtokových vírů. Cirkulace je definovaná jako křivkový integrál vektoru rychlosti okolo uzavřené křivky C. Carrière [7] uvádí, že aplikací Stokesovy věty je možné odvodit cirkulaci jako plošný integrál vektoru vířivosti na ploše S

$$\Gamma = \oint_C \vec{v} d\vec{l} = \oint_S \vec{\omega} d\vec{S} \quad (8)$$

3.2 Rychlosti ve vtokových vírech

Pro popis rychlostního pole v okolí turbín či čerpadel se využívají teoretické modely, které vycházejí ze základních profilů vírů. Níže uvedené modely předpokládají přítomnost ideální kapaliny. Nicméně proudění reálné kapaliny je ovlivňováno existencí vnitřního tření molekul, které je reprezentováno viskozitou kapaliny. Dalším vlivem je např. turbulence otáčejícího proudu. I přes tuto skutečnost většina i novějších autorů vliv viskozity zanedbává, nebo ji uvažují pouze v oblasti vírového jádra, kde předpokládají rozdělení rychlosti dle zákona [8]

$$\frac{v}{r} = \text{konst.} \quad (9)$$

3.2.1 Model tuhého tělesa

V případě modelu tuhého tělesa rotuje celý objem kapaliny a tangenciální rychlost proto narůstá se zvyšující se vzdáleností od středu víru (středu rotace) lineárně. Jedná se o nejjednodušší model a v praxi se s ním můžeme setkat například při dostatečně dlouhé rotaci nádoby s kapalinou. Průběh rychlosti je popsán vztahem: [2]

$$v_0(r) = \omega r \quad (10)$$

3.2.2 Potenciální vír

Potenciální vír má hodnotu vířivosti uzavřenou do singulárního bodu, okolo kterého kapalina proudí potenciálně ($\omega=0$). Singulární bod je ze soustavy vyloučen, a proto lze zbylé proudění považovat za nevířivé. Průběh rychlosti je poté stanoven rovnicí (11), kde C^1 je konstanta a r vzdálenost od středu rotace. Grafickým znázorněním vztahu mezi obvodovou rychlostí a vzdáleností od středu je poté hyperbola.

S potenciálním vírem se v přírodě ve skutečnosti nelze setkat, neboť nikdy nenastane situace, kdy je vířivost uzavřena do singulárního bodu, nicméně některé reálné víry lze za určitých podmínek² nahradit modelem potenciálního víru, čímž se zjednoduší řešení daného problému. [4]

$$v_0(r) = \frac{C}{r} \quad (11)$$

3.2.3 Rankinův model

Rankinův model vzniká spojením předcházejících dvou modelů. Předpokládá přítomnost hraničního poloměru r_c , který rozděluje vír na oblast chovající se podle modelu tuhého tělesa (jádro víru) a oblast chovající se podle modelu potenciálního víru (vnější proudění).³ Tento model již více odpovídá realitě, nicméně ve vzdálenosti r_c od osy otáčení model předpovídá ostré maximum, které neodpovídá realitě. Rankinův model sice nemůže být použit pro přesné odhady rychlostí a cirkulací skutečných trojrozměrných vírů, ale slouží jako základ pro novější pokročilejší metody, které berou v potaz parametry, se kterými Rankin nepočítal.⁴ Průběh rychlosti je popsán rovnicemi

$$v_0(r) = \omega r = \frac{\Gamma r}{2\pi r_c^2}; r < r_c \quad (12)$$

$$v_0(r) = \frac{konst}{r} = \frac{\omega r_c^2}{r} = \frac{\omega r_c^2}{r}; r > r_c \quad (13)$$

$$v_r = v_z = 0$$

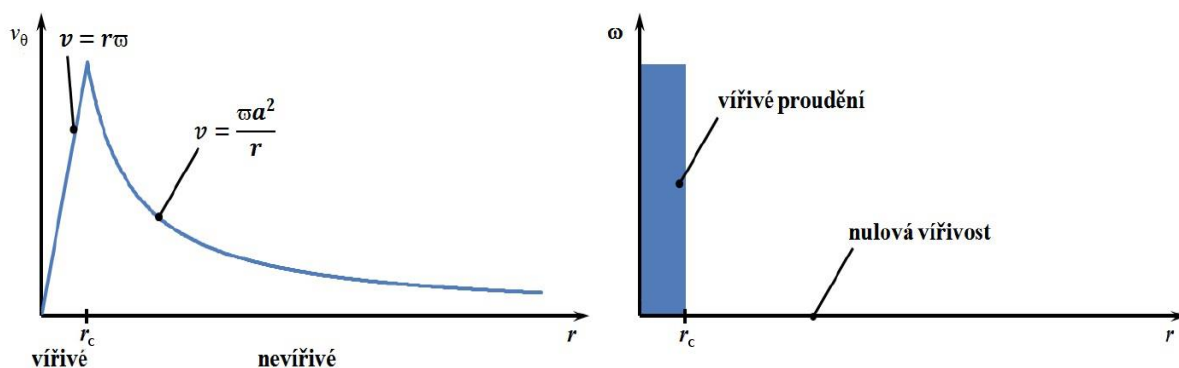
Poloměr jádra víru r_c je závislý i na velikosti průměru vtoku. Se zvyšující se intenzitou víru se tento poloměr může zvyšovat až na velikost, která je téměř úměrná velikosti vtoku, Vischer a Hager udávají typickou hodnotu $r_c = 3/8d$, kde d je průměr vtoku. [9] Na tomto poloměru lze pozorovat nejvyšší tangenciální rychlost.

¹ Rozměr konstanty C je m^2s^{-1} .

² Nejdůležitější podmínkou je vysoká hodnota Reynoldsova čísla (viz kapitola 4.2).

³ V cizojazyčné literatuře se nejčastěji setkáváme s pojmy forced vortex pro jádro víru a free vortex pro vnější proudění.

⁴ Např. radiální a axiální síly apod.



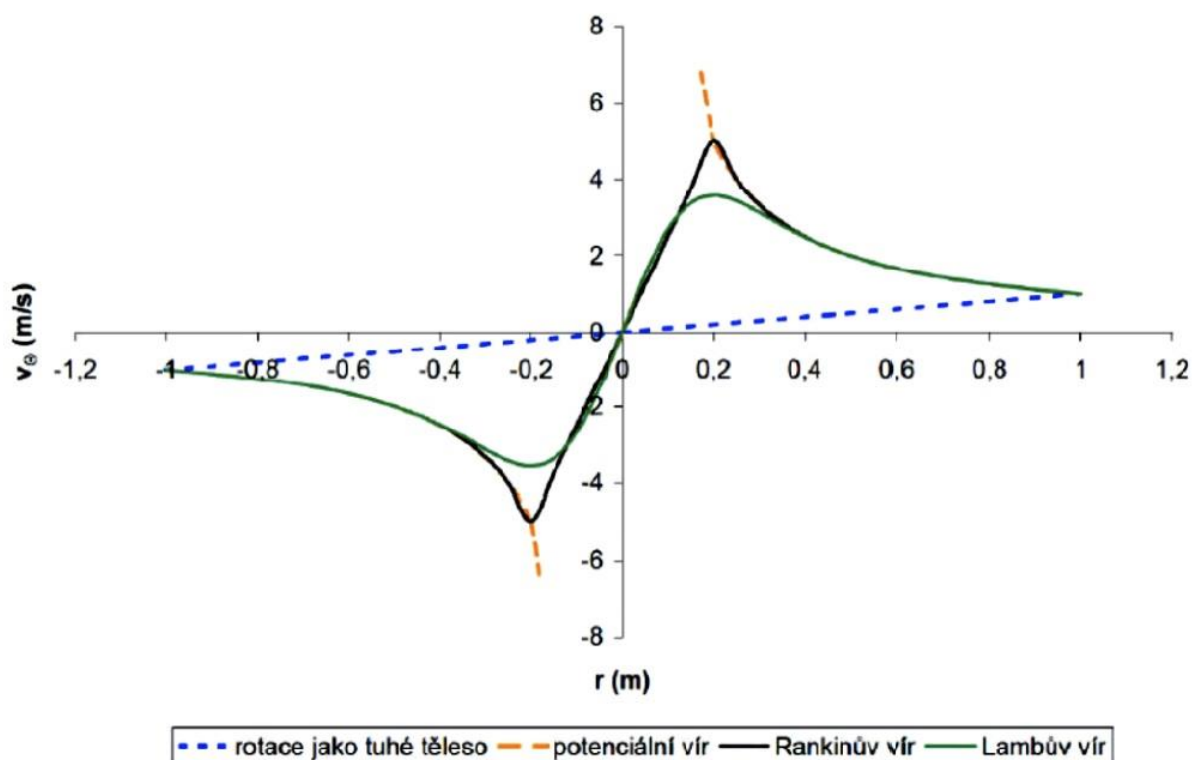
Obrázek 3: Průběh rychlosti a vířivosti Rankinova víru [3]

3.2.4 Lambův model

Lambův vír ze všech modelů odpovídá nejvíce reálnému průběhu tangenciální rychlosti. Vychází z Rankinova modelu – existuje vnitřní jádro o poloměru r_c , jehož chování odpovídá tuhému tělesu a okolní kapalina, která se chová v souladu s potenciálním vírem. Lambův model ovšem již započítává parametr viskozity, čímž dochází k vyhlazení extrému v okolí přechodu mezi jednotlivými oblastmi. Průběh tangenciální rychlosti poté vyjadřuje rovnice (14). [4]

$$v_0(r) = \frac{\omega r_c^2}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_c^2}\right) \right] \quad (14)$$

Následující graf zobrazuje průběh rychlostí jednotlivých modelů:



Obrázek 4: Průběh rychlostí pro jednotlivé modely vírů [3]

3.3 Mechanismy vzniku vtokového víru

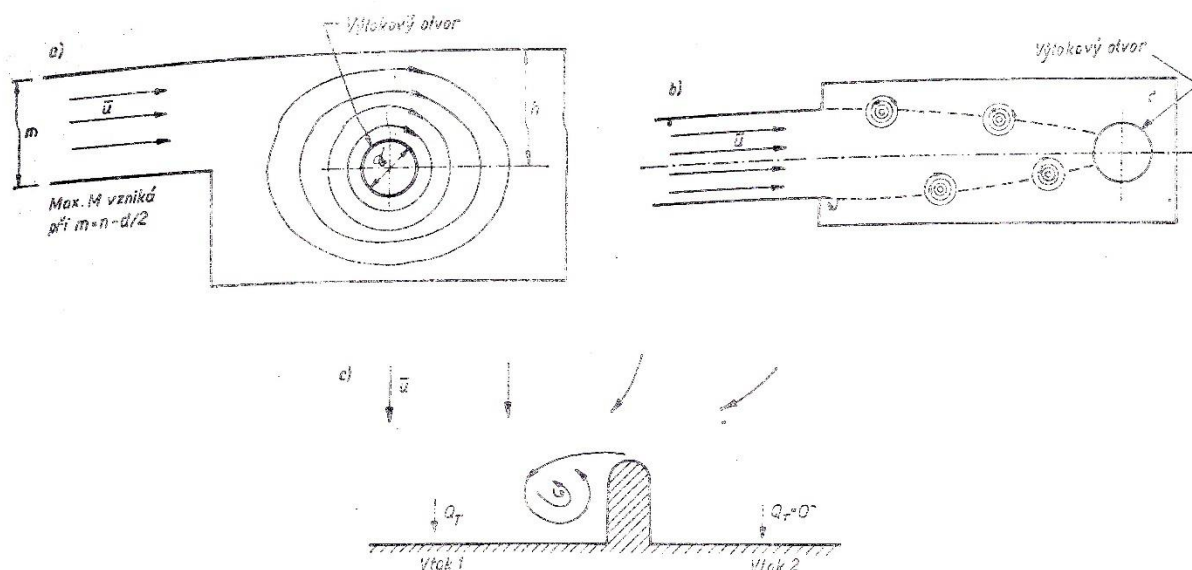
Základními mechanismy způsobujícími tvorbu vtokových vírů jsou cirkulace a axiální namáhání vírových struktur. Dle Aucklanda [10] cirkulace sama o sobě nestačí k vytvoření vtokového víru se vzduchovým jádrem, ale musí být zkombinovaná s axiálním namáháním, aby nastala situace vhodná pro tvorbu vtokového víru. Proces namáhání je poháněn axiální rychlostí vtoku, a proto jej můžeme vyjádřit jako funkci rozměrů a hloubky ponoru vtoku. Vznik vtokových vírů se vzduchovým jádrem závisí na třech základních požadavcích:

- Proudění vstupující do vtoku musí vykazovat vířivost.
- Hloubka ponoru musí být menší než kritická hloubka ponoru.
- Vtok musí být v místě podporujícím vytváření víru, což je závislé převážně na geometrii a stabilitě proudu.

Skalička [11] rozděluje vtokové víry podle příčiny vzniku na tři typy:

- a) Vtokové víry, jejichž zdrojem je velká vnější cirkulace vody v nádrži vyvolaná nesymetrickým přítokem vody do předpolí vtoku. Na tvorbě těchto vírů se podílí prakticky všechna voda protékající odtokem a je pro ně typická velká stabilita. S těmito typy víru je možné se setkat např. při odtoku potrubím nebo otvorem umístěným na dně nádrže. V hydrotechnice se vyskytují např. v ponořených vtokových objektech v horních nádržích přečerpávacích vodních elektráren, kde mohou v extrémních případech vznikat vtokové víry i o velikostech srovnatelných s průměrem vstupního profilu vtoku. Skalička uvádí, že kapacita vtoku může klesnout až o jeden řád.
- b) Vtokové víry, které získávají cirkulační energii z vírových vláken vznikajících v mezní vrstvě u stěn nádrže a na dělicích plochách mezi tranzitním prouděním a úplavou v předpolí vtoku. Pro tento typ víru je důležitá existence stagnační zóny proudu před nebo nad vtokem. Horní konec víru je často snášen mimo oblast vtoku, kde zaniká. Jedná se o málo stabilní vír. Vzduchové jádro bývá až o řád menší než průměr vtoku, a proto je méně nebezpečný než předchozí typ. Je možné ho pozorovat např. při náhlém rozšíření proudu.
- c) Třetí typ vtokových vírů je kombinací předchozích dvou typů. Dochází k němu při obtékání pevných překážek (např. dělicích pilířů), kdy dochází k odtržení proudu od stěny. Za překážkou na dělicí ploše mezi tranzitním proudem a úplavou dochází v oblasti stagnace k vytvoření stabilního víru. Pouze malá část průtoku se v tomto případě účastní proudění ve víru.

V některých případech může docházet při náhlém poklesu průtoku vody (např. havarijní odstavení) k působení cirkulačního impulsu, který dokáže dočasně změnit zanedbatelný neúplný vír na úplný nálevkovitý vír strhávající vzduch do oběhu. K tvorbě cirkulačního momentu mohou v menší míře napomáhat i vlny na hladině či působení větru.



Obrázek 5: Schéma vzniku vtokových vírů [11] a) Asymetrický přítok, vyvolávající mohutný vír, koncentrický s výtokovým otvorem b) Vírové prvky, vznikající při náhlém rozšíření koryta putující k výtokovému otvoru c) Vtokový vír u pilíře mezi dvěma vtoky vodní elektrárny

3.4 Klasifikace vtokových vírů

Klasifikaci vtokových vírů je možné provádět na základě tří základních kritérií:

- polohy,
- času,
- a intenzity víření.

Z hlediska polohy vůči vtoku se víry dělí na hladinové, stěnové a dnové víry. Hladinové víry jsou fixovány na vodní hladinu a jejich působením je do sacího potrubí strháván vzduch, který je odpovědný za většinu hlavních problémů, které jsou spojeny s vtokovými víry. Naopak stěnové a dnové jsou fixovány nejčastěji na dno a stěny a do oběhu přivádějí převážně nečistoty, jako např. hlínu či kamínky. Dále přispívají ke snížení tlaku v soustavě.



Obrázek 6: Zobrazení hladinového a dnového víru [10]

Druhý způsob klasifikace se provádí z hlediska času. [10] Zde je možné víry rozdělit na stabilní a nestabilní. Stabilita vtokových vírů závisí především na síle cirkulace a hloubce ponoru, přičemž s narůstající cirkulací a zmenšující se hloubkou se stabilita vírů zvyšuje. U stabilních vírů je možné pozorovat konstantní strukturu a sílu víru, kdežto u nestabilních se síla a struktura

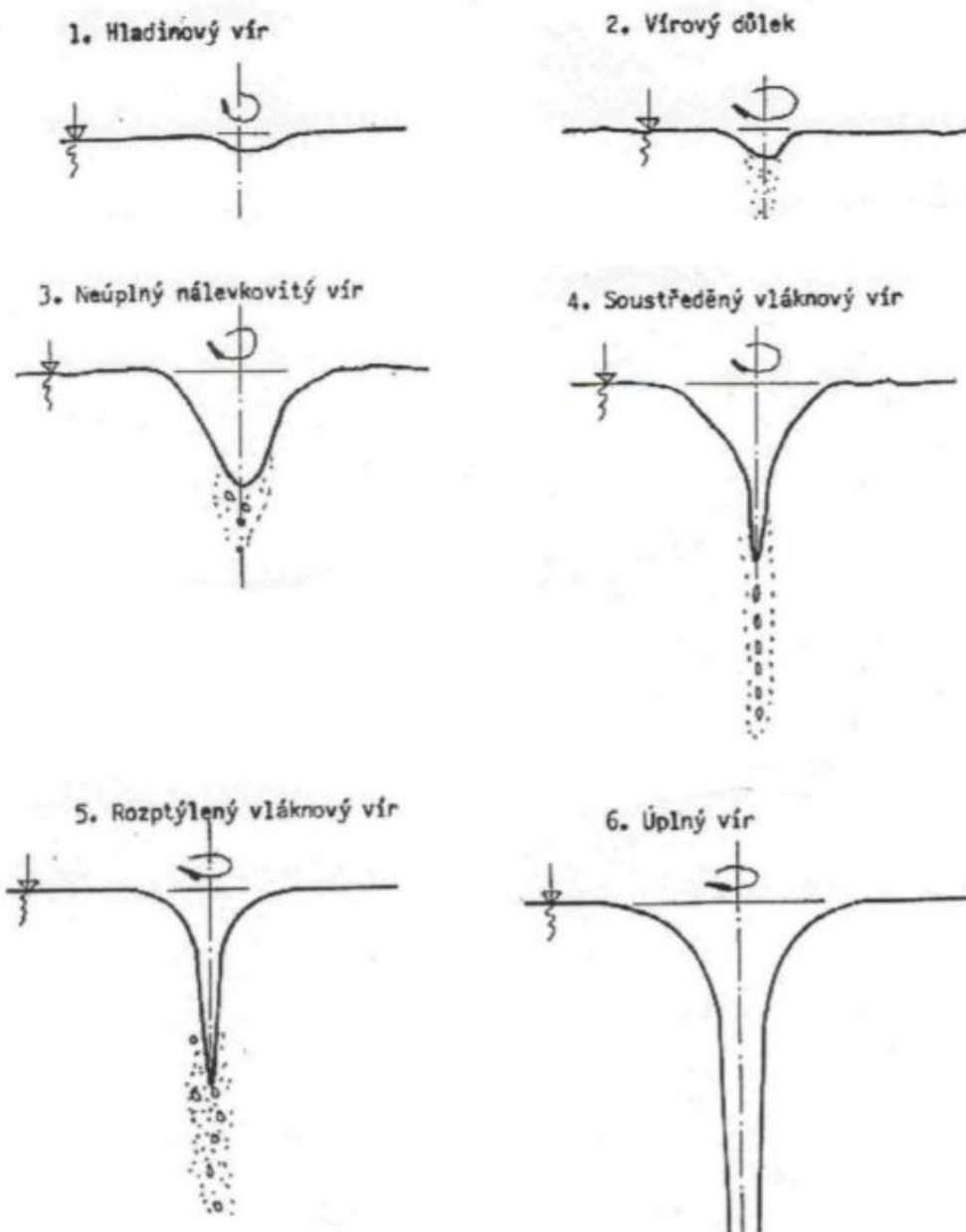
víru i objem vnikajícího vzduchu neustále mění. Obecně se dá říci, že se nestabilní víry vyskytují na hranici mezi stabilním vírem a stavem, kdy nedochází k tvorbě vtokového víru. Nestabilita víru zapříčiňuje náhodnost proudu, a proto není možné odhadnout, jak se bude výsledná soustava chovat. Nestabilita navíc napomáhá fluktuacím proudu, neboť snižuje množství vody, které proudí do sacího potrubí, což má za následek snižování cirkulace až v úplný zánik vtokového víru. Po zániku vtokového víru se po nějaké době velikost proudu opět navýší a ustálí, což má za následek zvýšení cirkulace a s tím spojený opětovný vznik vtokového víru.

Klasifikace z hlediska intenzity víření bývá značně problematická. Parametry potřebné k vyjádření síly víru (převážně cirkulace) jsou obtížně měřitelné a jejich měření může znatelně ovlivnit charakteristiky víru. V praxi se tento problém řeší buď měřením veličin, které jsou přímo nebo nepřímě závislé na síle víru, nebo klasifikací na základě vizuálního posouzení podoby víru.

Měřenou veličinou může být např. množství nasávaného vzduchu. Problém nastává při hledání závislosti mezi měřenou veličinou a silou víru. Z důvodu komplexity vtokových vírů může být závislost velmi malá nebo velmi proměnná s ohledem na jiné parametry. Navíc je nutné říci, že měření těchto přímo a nepřímě závislých veličin je většinou také obtížné.

Vizuální přístup spočívá v subjektivním zhodnocení stádia víru pozorovatelem. V literatuře je většinou popsáno 6 druhů vtokových vírů [10][11][12]. Jsou vyobrazeny na obr. 7. Rozlišujeme:

- **Hladinový vír:** Projevuje se krouživým pohybem kapaliny u hladiny a částečným zvlněním hladiny.
- **Vírový důlek:** Vzduchové bubliny jsou strhávány pod hladinu a následně se vracejí zpět k hladině.
- **Neúplný nálevkovitý vír:** Vytváří se nálevka se vzduchovým jádrem. Bublínky se stále vracejí zpět k hladině.
- **Soustředěný vláknový vír:** Vytváří se úzká hlubší nálevka se vzduchovým jádrem. Bublínky vytvářejí vláknový řetězec. Pouze malá část bublinek se vrací zpět k hladině, zbylé jsou strhávány do vtoku.
- **Rozptýlený vláknový vír:** Nálevka je stále stejná jako v případě soustředěného vláknového víru. Vzduchové bublinky vyvážejí jemnou rozptýlenou mlhu a velká část je jich strhávána do vtoku.
- **Úplný vír:** Vytváří se hluboká nálevka se souvislým vzduchovým jádrem. Vzduch je intenzivně strháván do vtoku.

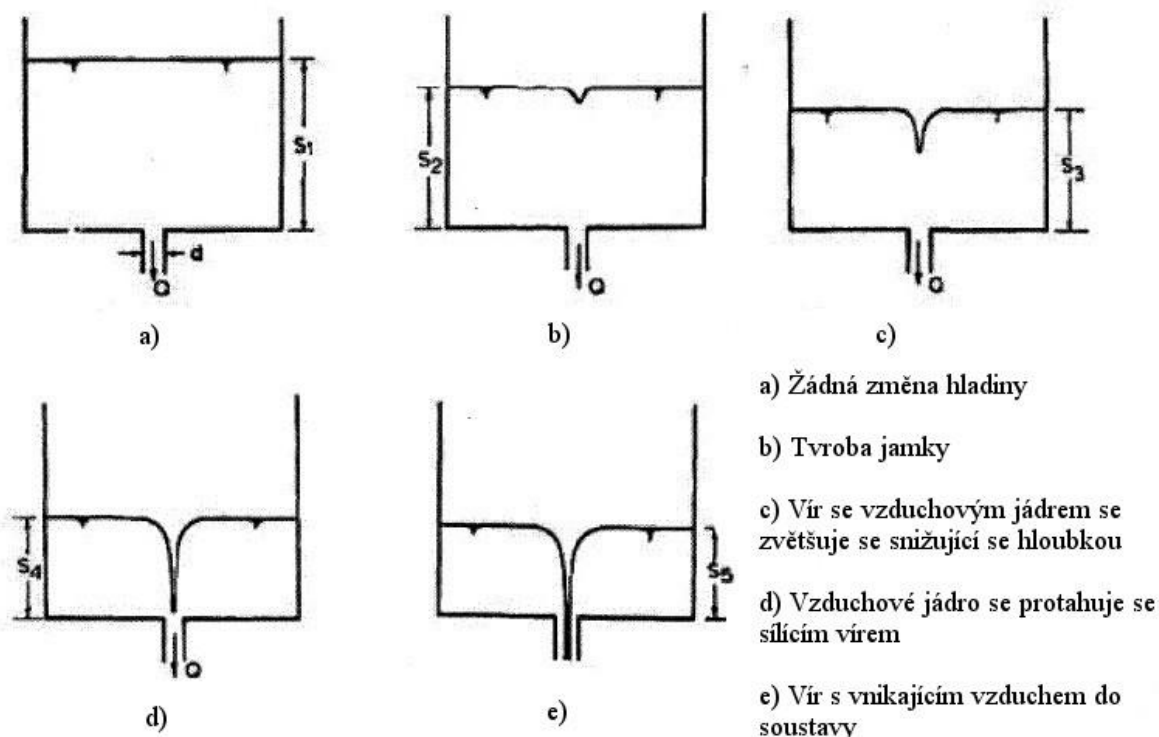


Obrázek 7: Stádia vtokových vírů [11]

Problém s vizuálním přístupem je na první pohled patrný. Pozorování je zatížené subjektivním názorem pozorovatele, a navíc je velmi časově náročné, neboť vyžaduje přítomnost pracovníka. Dále by měl porovnání provádět pouze jeden pozorovatel, aby nedošlo k rozdílnému popisu jednoho a téhož víru. Druhý problém s vizuálním porovnáváním pramení z rychlosti, se kterou se jednotlivá stádia víru mohou měnit. V podstatě se dá říci, že všechna stádia, až na stádium úplného víru, jsou těžko rozlišitelná od sebe a rychle se mění. Naštěstí je právě stádium úplného víru nejdůležitější a v praxi stačí stanovit parametry při vzniku právě tohoto stádia.

3.5 Kritická hloubka ponoru

Velký vliv na tvorbu úplného nálevkovitého víru má hloubka ponoru sacího potrubí, která musí být větší než kritická hloubka ponoru. Ta je definována jako hloubka, při které jsou cirkulační mechanismy a mechanismy namáhání dostatečné na vytvoření nálevkovitého víru se vzduchovým jádrem. [10] Jedná se o nejčastější definici, která je dále používána v této práci, nicméně je nutné zmínit, že někteří autoři pokládají za kritickou hloubku ponoru situaci, kdy se vtokový vír dostane ke vtokovému sacímu potrubí a začnou do něj vstupovat bublinky vzduchu. Jednotlivá stádia tvorby nálevkovitého víru jsou ilustrována na obrázku č. 8.



Obrázek 8: Schéma vzniku vtokového víru v závislosti na hloubce ponoru [10]

Möller [13] uvádí, že autoři studující vertikální sací jímky orientované směrem vzhůru se shodují, že kritická hloubka ponoru je ovlivněna vzdáleností sacího potrubí od stěn a dna nádoby. Se zvyšující se vzdáleností stěn nádoby se zvyšuje kritická hloubka a se zvyšující se vzdáleností dna se naopak kritická hloubka snižuje. Orientačně se dá říci, že kritická hloubka nezávisí na vzdálenostech od stěn při vzdálenosti větší než $8D$ a od dna při vzdálenosti $h/D < 4$.

Výzkumy zabývající se hloubkou ponoru je možné rozdělit do dvou skupin. První skupina se snaží odvodit závislost kritické hloubky na známých počátečních parametrech jako je hloubka vnoření a rychlost proudění. Druhá skupina odvozuje závislost na rotačních parametrech (převážně cirkulace) v oblasti vtoku. S ohledem na navržení experimentu jsou výsledky druhé skupiny lidí pro tuto práci nepodstatné a dále se jimi nebudeme zabývat.⁵

⁵ Závislostí kritické hloubky ponoru na rotačních parametrech se zabývají např. Amphlett [15] nebo Gorbachev [16].

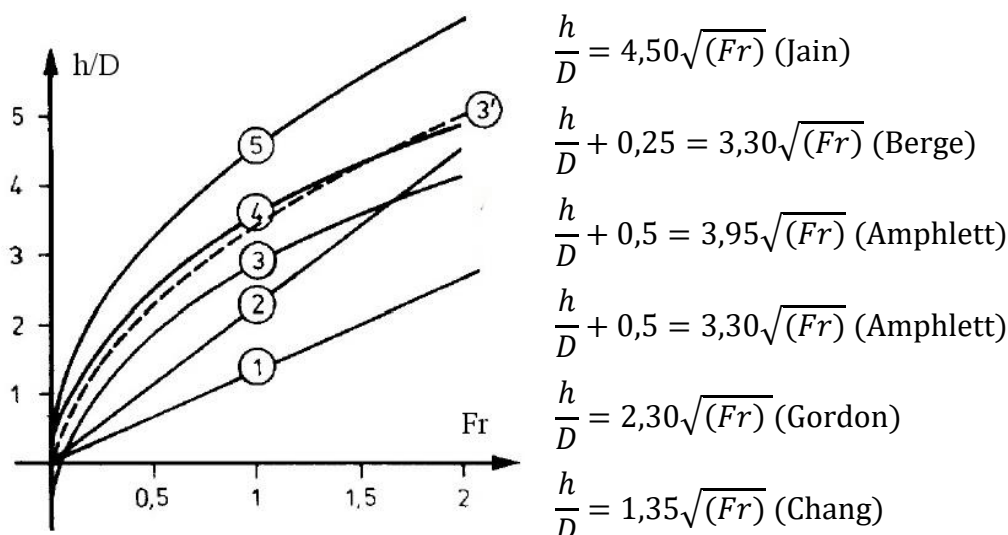
Kritická hloubka ponoru je nejčastěji udávána v závislosti na následujících parametrech: [14]

- průměr sacího potrubí,
- rychlost proudu v sacím potrubí,
- rozměry objektu v okolí vtoku,
- Froudovo číslo (viz kapitola 4.1).

Möller [13] dále uvádí, že obecný tvar pro výpočet kritické hloubky ponoru je vyjádřen pomocí vztahu:

$$\left(\frac{h}{D}\right)_{cr} = \xi Fr + 0,5 \quad (15)$$

Jednotliví autoři doporučují různé velikosti ξ v závislosti na tom, zda se jedná o symetrický či asymetrický přítok. Na obrázku č. 9 je možné vidět odvozené vztahy různých autorů zabývajících se danou problematikou. Diagram může být použit pro horizontální i vertikální vtoky. Na první pohled je patrné, že doporučené hodnoty předvídaných kritických hloubek se velmi liší. Vzhledem k vysoké komplexitě vírového proudění se nedá přesná hodnota určit, a proto se jedná spíše o orientační vztahy. V reálných situacích se kritická hloubka předvídá pomocí experimentu na modelu konkrétního vtokového systému. Výsledný vztah odvozený z naměřených hodnot je poté vhodné porovnat se vztahy minulých publikací.



Obrázek 9: Závislost kritické hloubky na Froudově čísle [13]

Nejčastější v praxi používané vztahy lze vidět v tabulce č. 2:

Autor	h_{cr}	Poznámky
Rohan	$= 1,474 v_D^{0,48} D^{0,76}$	
Gordon	$= \xi v_D \sqrt{D} + 0,5D$	$\xi = 0,5432$ pro symetrický přítok $\xi = 0,7245$ pro nesymetrický přítok
Knauss	$= \left(2 \frac{v_D}{\sqrt{gD}} + 0,5\right) D$	
Šulc	$= 1,95D + (0,55Fr^2)D$	
Gulliver	$= 0,5D + (0,4Fr)D$	

Tabulka 2: Vztahy pro výpočet kritické hloubky podle jednotlivých autorů [12] [13]

3.6 Negativní vliv vtokových vírů

V případě, kdy dochází k vnikání vzduchu do systémů, se změní vlastnosti tekutiny z jednofázové na dvoufázovou (čistá voda na směs vody a vzduchu). Tato změna má, převážně u nízkotlakých elektráren, rezervních turbín a čerpacích stanic, nepříznivý vliv. V pracích Doc. Ing. Skaličky [11] a George Möllera [13] jsou uváděny zejména tyto negativní vlivy:

- snížení účinnosti turbín a čerpadel,
- snížení průtokové kapacity, pulzace průtoku a kolísání tlaku,
- zvýšení tvorby koroze,
- zvýšení vibrací zařízení vtoku i vlastních vodních strojů a s tím spojená vysoká intenzita hluku.

Účinnost hydraulických strojů je spojena s objemovým obsahem vzduchu β (16) v sacím potrubí.⁶ Dle výzkumů Dennyho a Younga [11] při $\beta=1$ % je účinnost hydraulických strojů snížena až o 15 %. Se zvyšujícím se objemovým obsahem vzduchu se účinnost přibližně exponenciálně zvyšuje, ovšem přesné hodnoty nelze odhadnout. Nálevkovité víry mohou strhávat vzduch o objemu přes 10 % objemu vody, kdy dochází k náhlému poklesu účinnosti až do úplného zastavení proudění.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (16)$$

Druhá skupina dopadů je způsobena tvorbou vzduchových bublin (vzduchové pytle), jejichž unikání z potrubí je doprovázeno rázovými jevy se značnými změnami tlaku. Maxima tlaku mohou dosahovat vysokých hodnot a vlivem periodického opakování dochází ke značným změnám namáhání. Dále dochází ke kavitaci, která má destruktivní dopad na materiál turbín či čerpadel. Změny průtokové kapacity mají negativní dopad převážně na efektivitu hydraulických strojů, a to buď z důvodu menšího průtoku, nebo z nutnosti fungovat za neideálních podmínek, aby nedocházelo k vytváření vtokových vírů.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4, vtokové víry nemusí být fixovány pouze na hladinu, ale i na dno. U nich sice nedochází ke strhávání vzduchu do sacích hlavíc, nicméně napomáhají strhávání nečistot a usazenin do potrubí, což má opět negativní vliv na fungování hydraulického stroje.

⁶ V rovnici Q_a vyjadřuje objemový průtok vzduchu a Q_w objemový průtok vody.

4. Mechanická podobnost v hydraulice

4.1 Zákony modelové podobnosti

Proudění ve vtokových objektech je doposud nemožné řešit analytickými metodami, a proto se využívají experimentální metody, které jsou prováděny buď na skutečných dílech, nebo na zmenšených modelech. Měření na modelech nám poskytuje celou řadu výhod (např. nižší čas a náklady), nicméně teoretické a experimentální odhady nakonec stejně musíme ověřit na skutečném díle. Aby bylo z výsledků na zmenšených modelech možné odhadnout jevy vznikající na skutečné stavbě, je potřeba, aby bylo proudění na modelu a ve skutečnosti podobné. V literatuře Hydraulika [17] Šulc uvádí, že dva jevy jsou si mechanicky podobné, jsou-li splněny podmínky:

- geometrické,
- kinematické,
- a dynamické

podobnosti a odvozuje příslušné vztahy. Hodnoty popisující veličiny na modelu jsem označeny indexem M a hodnoty popisující skutečnou stavbu jsou bez indexu.

Geometrická podobnost:

Pro libovolné dva sobě odpovídající rozměry musí být zachován stálý poměr, který se nazývá délkové měřítko λ_L :

$$\lambda_L = \frac{L}{L_M}, \quad (17)$$

pro měřítko ploch:

$$\lambda_S = \frac{S}{S_M} = \lambda_L^2, \quad (18)$$

pro měřítko objemů:

$$\lambda_V = \frac{V}{V_M} = \lambda_L^3. \quad (19)$$

Kinematická podobnost:

Dráhy, které opisují sobě odpovídající částice proudu ve stejných dobách, jsou stejné. Poměrem časů získáváme měřítko času:

$$\lambda_t = \frac{t}{t_M}. \quad (20)$$

Z měřítka času lze odvodit měřítko rychlosti,

$$\lambda_v = \frac{v}{v_M} \quad (21)$$

zrychlení a průtoků (viz [17]).

Dynamická podobnost:

Dynamická podobnost vyžaduje, aby byl poměr sil určen měřítkem sil a poměr hmotností měřítkem hmotností. Aplikací měřítek na Newtonův zákon je poté odvozen vztah:

$$\frac{F}{\rho v^2 L^2} = konst. \quad (22)$$

Rovnice (22) vyjadřuje obecný Newtonův zákon podobnosti a proudění si jsou mechanicky podobná, pokud má zlomek stejnou hodnotu pro obě proudění. Na základě převažujících účinků poté rozlišujeme základní kritéria mechanické podobnosti, mezi která patří:

- Froudeovův zákon podobnosti (Froudovo číslo),

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{Lg}} \quad (23)$$

nebo

$$Fr = \frac{v^2}{Lg} \quad (24)$$

vyjadřující vliv tíže. Froudovo číslo se využívá převážně při modelování staveb s volnou hladinou. Např. přelivy, jezy, účinky vln, proudění čerpadly apod. Ve starší a ruské literatuře se setkáváme převážně se vztahem v odmocninovém tvaru. V novější literatuře je Froudovo číslo uváděno v mocninném tvaru, který je v práci dále pro přehlednost označen jako Fr^2 .

- Reynoldsův zákon podobnosti (Reynoldsovo číslo),

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (25)$$

vyjadřující vliv třecích sil. Reynoldsovo číslo se využívá převážně při modelování jevů, které nejsou ovlivněny existencí vodní hladiny. Např. tlakové proudění v potrubí, obtékání těles apod.

- Weberův zákon podobnosti (Weberovo číslo),

$$We = \frac{Lv^2 \rho}{\sigma} \quad (26)$$

vyjadřující vliv povrchového napětí. Weberovo číslo se často užívá ve slévárenství či modelování vtokových soustav odlitku.

- Strouhalův zákon [18]

$$Sh = \frac{fl}{v} \quad (27)$$

Pro posouzení dvou kinematických systémů se používá Reynoldsovo nebo Froudovo číslo na základě toho, zda převažují síly vazké, či setrvačné. Jejich platnost však není univerzální, a proto je pro obecná hodnocení podobnosti dvou kinematických systémů používáno Strouhalovo číslo. Jedná se o nejobecnější fyzikální kritérium pro kinematickou podobnost v teorii hydromechaniky a aeromechaniky. Bylo prokázáno, že toto číslo je funkcí Reynoldsova a

Machova čísla. Jelikož se se jedná o kritérium týkající se převážně periodických jevů, je možné ho najít v různých tvarech:

$$Sh = \frac{fl}{v} = \frac{nl}{v} = \frac{l}{vT} = \frac{\omega l}{v} \quad (28)$$

4.2 Modelová podobnost při vzniku vírů ve vtokových objektech

Při modelování vířivého pohybu nastává problém, že základní kritéria modelové podobnosti nemůžeme využít, protože jedním z důležitých parametrů, které musí být v modelové podobnosti je cirkulace víru. Žajdík [19] popisuje, že při geometrické podobnosti v měřítku λ_L by byla cirkulace v modelové podobnosti pouze, pokud by splňovala všechna tři základní kritéria Fr , Re a We (23)(25)(26). Z modelového výzkumu je však známo, že tuto podmínku nelze dodržet. Z tohoto důvodu se přistupuje ke kompromisu mezi jednotlivými kritérii, kdy se výzkumy vírů realizují na modelu za stejných rychlostí jako na skutečném díle. Měřítko rychlosti je proto rovno jedné.

$$\lambda_v = \frac{v}{v_M} = 1 \quad (29)$$

Paciga, Strýček a Gančo [20] ve svých pracích zvolili jiný postup, kdy tvrdí, že v prostoru vtokové nádrže by mělo být zachováno Froudovo číslo, neboť největší vliv na tvorbu vírů mají síly gravitační. Ve svých pracích přicházejí s návrhem nové kombinace Froudova a Weberova kritéria. Autoři doporučují provádět výzkum vírů pouze za vyšších Reynoldsových čísel, na dostatečně velkých modelech s průměrem nasávacího potrubí větším než 0,15 m. Při splnění těchto kritérií je možno použít následující vztahy:

- Délkové rozměry:

$$L = \lambda_L L_M \quad (30)$$

- Průtok:

$$Q = \lambda_L^{2,5} Q_M \quad (31)$$

- Kritická výška nad okrajem sacího zvonu:

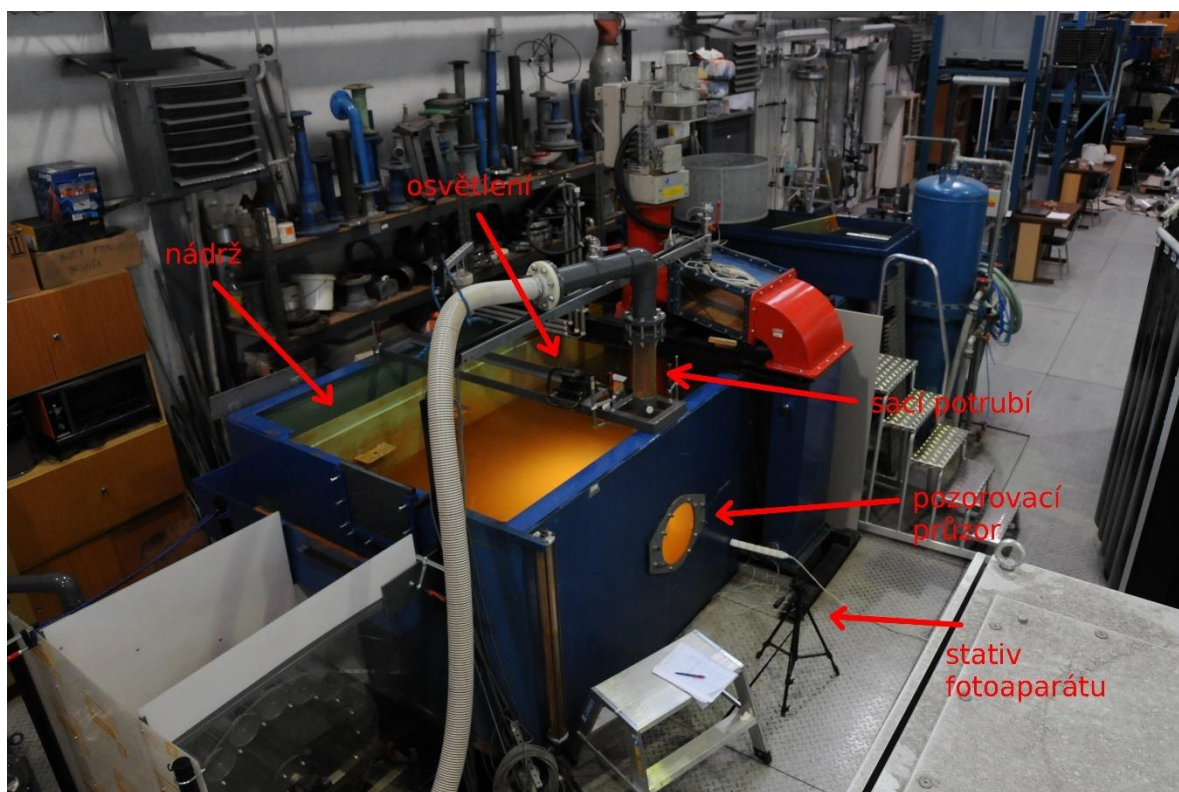
$$h_0 = \lambda_L^{1,2} h_{0M} \quad (32)$$

Na příslušných vztazích můžeme vidět, že horní index nad délkovým měřítkem je větší než 1, a proto musí být na modelu použita přísnější kritéria než na skutečném díle.

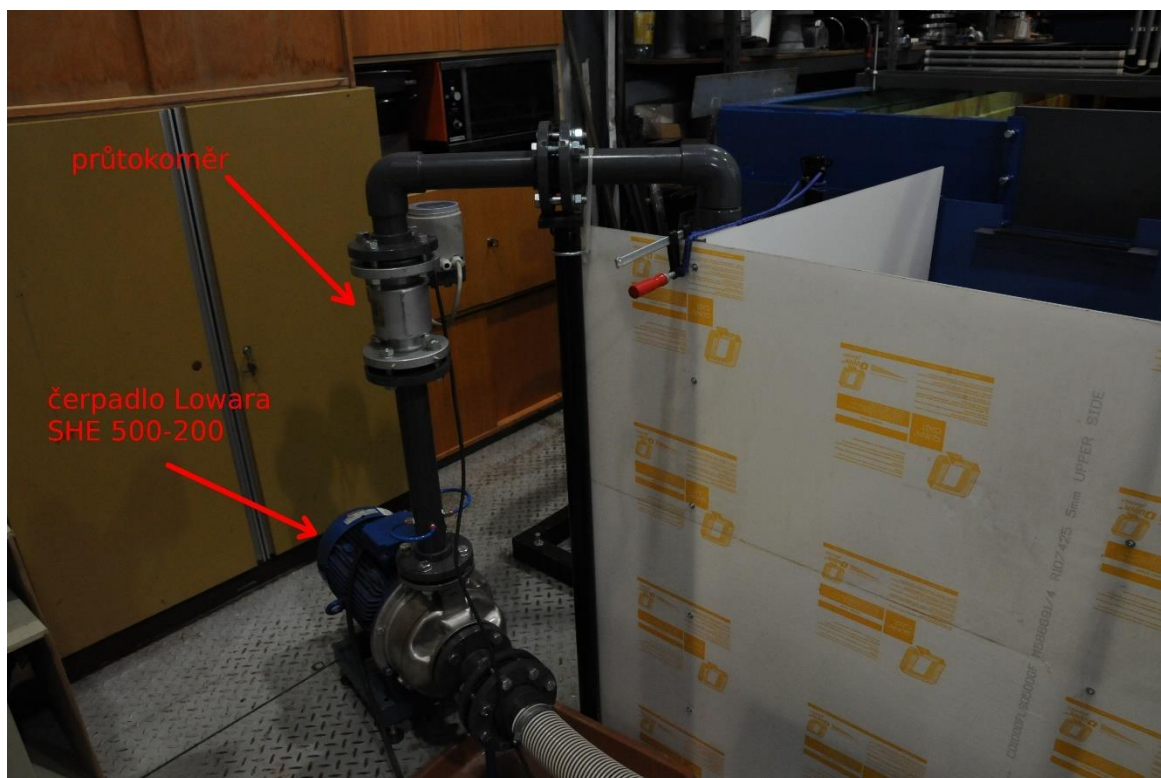
5. Experimentální část

5.1 Experimentální zařízení

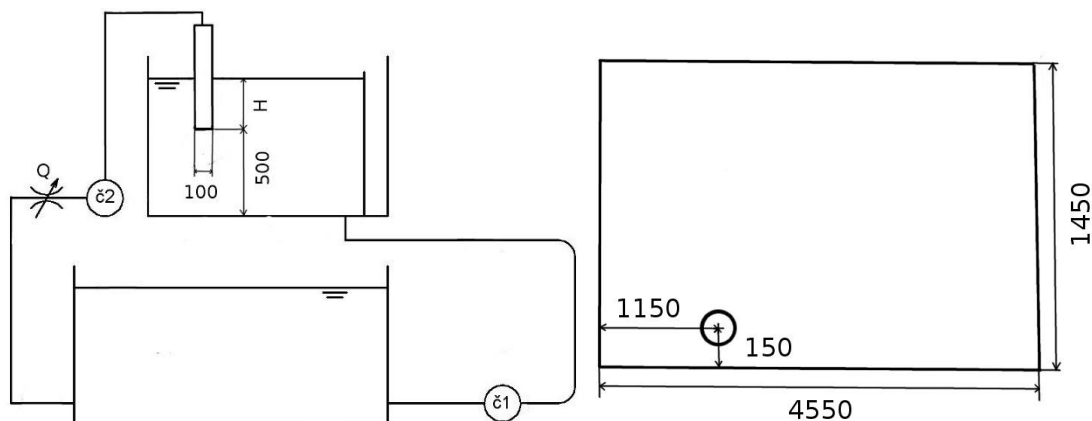
Experimentální část byla prováděna na zařízení sestaveném v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana. Okruh se skládá z otevřené nádrže obdélníkového tvaru o rozměrech plochy 4,55x1,45 m, čemuž odpovídá plocha 6,5975 m². Výška nádrže je 1,26 m. Na přední straně nádrže se nachází průhledný průzor, aby bylo možné pozorování tvořících se vírů. Do nádrže je v místě průzoru vertikálně zanořeno průhledné sací potrubí o průměru 100 mm. Umístění vtoku lze vidět na schématu zařízení (obr. 12). Průhledné sací potrubí bylo opatřeno ryskami, díky kterým lze odečítat hloubku zanoření. Řadou nástavců je možné upravovat průměr sacího potrubí, nicméně pro tento konkrétní experiment byl průměr konstantní. Sací efekt zajišťuje čerpadlo Lowara SHE 500-200 o výkonu 11kW, čemuž odpovídá průtok $Q = (10 \div 24,2)$ l/s. Čerpadlo je vybaveno průtokoměrem měřícím aktuální průtok v okruhu. Voda dále odchází do podzemních nádrží, odkud je čerpána zpět do otevřené nádrže pomocí ponorných čerpadel ovládaných z řídicího stanoviště. Nastavování výšky hladiny v nádrži je prováděno pomocí potenciometru.



Obrázek 10: Experimentální zařízení (pohled shora)



Obrázek 11: Experimentální zařízení (pohled na čerpadlo)



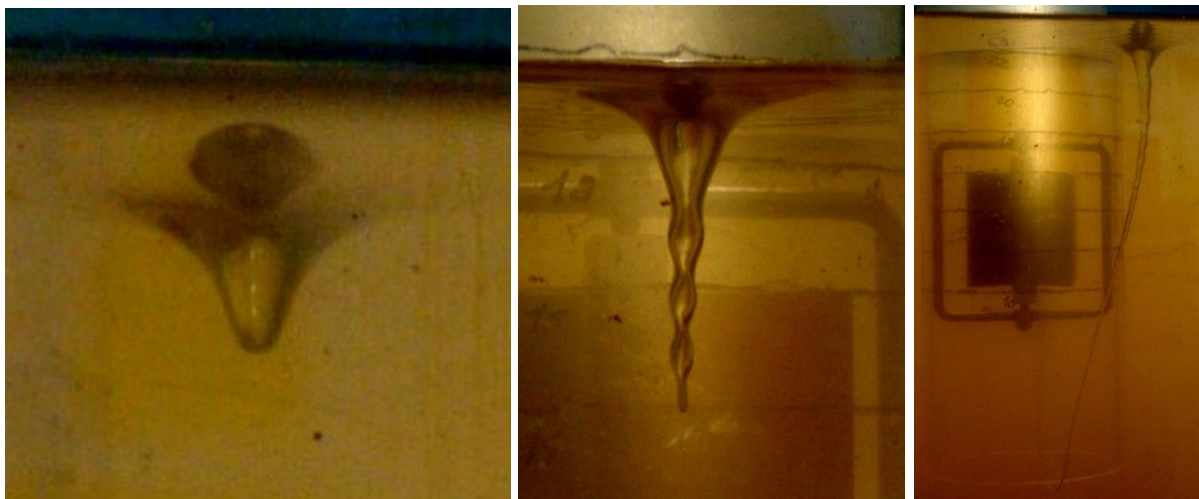
Obrázek 12: Zleva schéma měřicího okruhu, náčrt půdorysového pohledu horní nádrže

5.2 Postup měření

S ohledem na výkon čerpadla a předpokládanou kritickou hloubkou zanoření sacího potrubí, která byla odhadnuta na základě experimentů jednotlivých autorů a zkušeností pracovníků hydraulické laboratoře, bylo vytvořeno 20 zkoumaných situací. Ty byly vytvořeny kombinacemi nastaveného průtoku Q a hloubky zanoření H . Zkouška byla prováděna pro průtok $Q = 22; 18; 14; 10$ l/s a pro zanoření $H = 26; 22; 18; 14; 10$ cm. Průtok Q byl nastavován pomocí změny otáček čerpadla a následné kontroly požadovaného průtoku na průtokoměru⁷. Zanoření sacího potrubí bylo nastavováno zvyšováním výšky hladiny v celé nádrži pomocí ponorných čerpadel, ovládaných potenciometrem na řídicím pultu.

⁷ Průtokoměr udává průtok přímo v l/s, což napomáhá snadnému nastavení.

Po ustálení hladiny v nádrži byla sledována tvorba vtokových vírů v časovém intervalu $t = 4$ min. Tvořící se víry byly zaznamenávány pomocí digitálního (zrcadlového) fotoaparátu NIKON D90. Hladinové víry nebyly fotografovány, ale pouze zapisována jejich přítomnost v jednotlivých situacích⁸. Podobný postup byl zopakován pro všech 20 navržených situací a jednotlivé fotografie vírů následně klasifikovány podle rozdělení popsaném Skaličkou (viz kapitola 3.4).



Obrázek 13: Přehled jednotlivých typů vírů pozorovaných na experimentálním zařízení. Zleva vírový důlek, neúplný nálevkovitý vír, úplný nálevkovitý vír se vzduchovým jádrem.

Je nutné říci, že všechny typy vírů jsou místně i časově nestabilní. Z důvodu krátkého měřeného časového intervalu byla při rozhodování o typu víru aplikována zásada, že stačí jediný výskyt konkrétního typu víru, aby byla situace klasifikována jako situace s výskytem daného typu víru. Po zbytek intervalu se mohly tvořit nižší formy víru nebo mohlo být proudění bez výskytu víru.

Kritická hloubka zanoření byla poté stanovena jako poslední hloubka, při které se pro konkrétní průtok ještě tvoří úplné nálevkovité víry se vzduchovým jádrem. Výsledné hodnoty kritické hloubky zanoření byly poté porovnány s teoretickými hodnotami spočítanými doporučenými rovnicemi od jednotlivých autorů zabývajících se problematikou vtokových vírů. Konkrétně jde o autory Rohana, Gordona, Knausse, Šulce a Gullivera, jejichž rovnice jsou popsány v kapitole 3.5.

5.3 Vyhodnocení měření

Fotografie pořízené z jednotlivých situací byly porovnány s předlohou podle Skaličky a nejvyšší forma víru zaznamenaná do tabulky 3. Podrobný popis pro jednotlivé hodnoty průtoku je zpracovaný v následujících kapitolách. Fotografie byly před klasifikací upravené v programu Gimp, aby byl lépe vidět kontrast mezi vírem a okolním prostředím, a to hlavně z důvodu zakalené vody, které znesnadňuje klasifikaci vírů. Většina vírů byla unášena napravo od sacího potrubí, kde postupně zanikala. Voda je do nádrže hnána zprava a následně se odráží od levé boční stěny a vrací se zpět oblastí, kde se nachází sací potrubí, a strhává víry doprava. Vznikající víry jsou velmi nestabilní, a proto rychle zanikají. Všechny formy vírů jsou doprovázeny hladinovými víry.

⁸ Hladinové víry nejsou pod hladinou vidět, a proto je fotoaparát nastavený pro záznam vtokových vírů pod hladinou nemůže zaznamenat. Jejich přítomnost není pro výsledek experimentu podstatná, a proto nebylo nutné použít druhý fotoaparát namířený na hladinu.

označení	Q [l/s]	H [cm]	klasifikace
Q22H10	22	10	úplný nálevkovitý vír
Q22H14	22	14	úplný nálevkovitý vír
Q22H18	22	18	úplný nálevkovitý vír
Q22H22	22	22	úplný nálevkovitý vír
Q22H26	22	26	vírový důlek
Q18H10	18	10	úplný nálevkovitý vír
Q18H14	18	14	úplný nálevkovitý vír
Q18H18	18	18	úplný nálevkovitý vír
Q18H22	18	22	neúplný nálevkovitý vír
Q18H26	18	26	neúplný nálevkovitý vír
Q14H10	14	10	úplný nálevkovitý vír
Q14H14	14	14	úplný nálevkovitý vír
Q14H18	14	18	neúplný nálevkovitý vír
Q14H22	14	22	vírový důlek
Q14H26	14	26	neúplný nálevkovitý vír
Q10H10	10	10	úplný nálevkovitý vír
Q10H14	10	14	neúplný nálevkovitý vír
Q10H18	10	18	vírový důlek
Q10H22	10	22	hladinový vír
Q10H26	10	26	víry se netvoří

Tabulka 3: Přehled nejvyšší formy víru pro jednotlivá měření

Jak lze vidět v tabulce 3 kritická hloubka zanoření pro průtok $Q = 22$ l/s je $H_c = 22$ cm, pro $Q = 18$ l/s je $H_c = 18$ cm, pro $Q = 14$ l/s je $H_c = 14$ cm a pro $Q = 10$ l/s je $H_c = 10$ cm. Úplné hladinové víry se vzduchovým jádrem byly doprovázeny silným akustickým jevem a viditelným vnikáním vzduchu do sacího potrubí.

Zajímavým jevem je současná tvorba dvou nálevkovitých vírů s úplným vzduchovým jádrem při zanoření $H = 14$ cm, a to při $Q = 22$ l/s i $Q = 18$ l/s. Dva víry se mohou vyskytovat, pokud se nebude první vír pohybovat a současně budou přetrvávat podmínky pro vznik dalších vírových jader v okolí, přičemž nedojde k jejich interakci tak, aby se například vzájemně rušily nebo naopak posilovaly. Vzhledem k nepředvídatelnosti vírového proudění je ovšem přesný důvod současného výskytu dvou vírů neznámý a můžeme předpokládat, že je zcela náhodný.

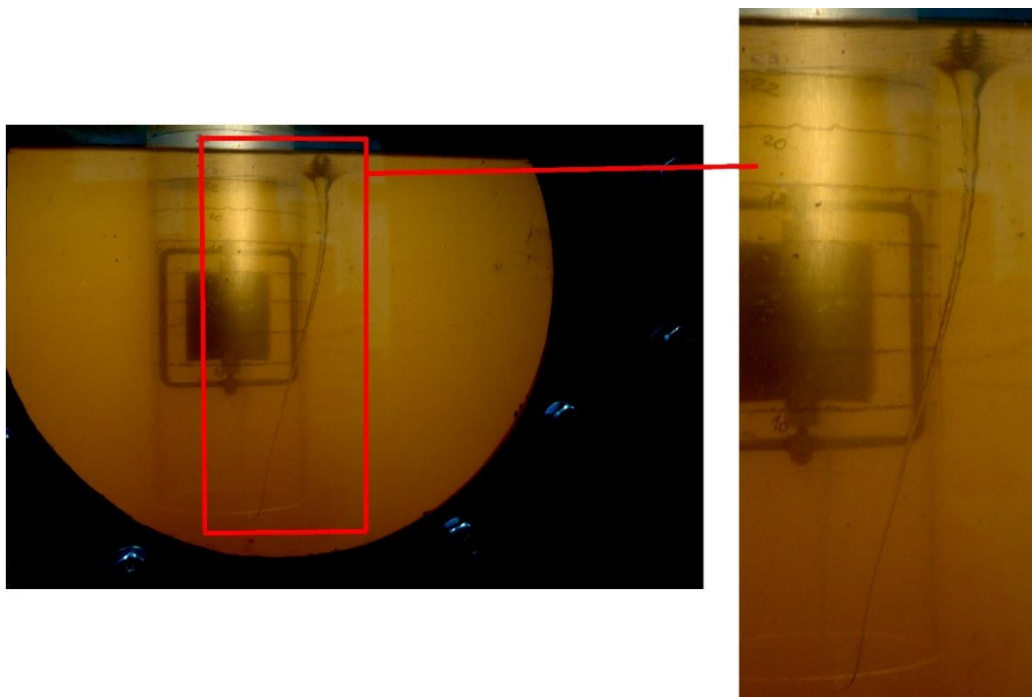
Vzhledem k časové náročnosti měření jednotlivých situací a následné klasifikace fotodokumentace se vizuální přístup jeví pro větší množství vzorků jako nevyhovující, nicméně plně automatizovaný systém klasifikace není dosud známý.



Obrázek 14: Dva nálevkovité víry s úplným vzduchovým jádrem (měření H14Q22)

5.3.1 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 22$ l/s

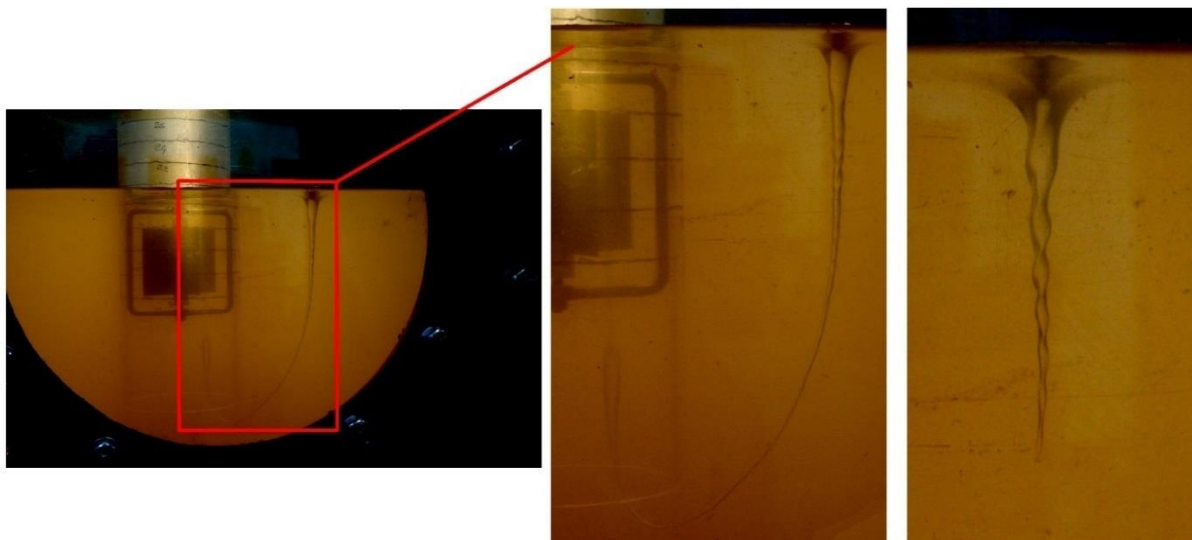
Při průtoku $Q = 22$ l/s docházelo při zanoření $H = 26$ cm k tvorbě hladinových vírů, které se sporadicky přeměňovaly na vírové důlky. S klesající hodnotou zanoření se začaly tvořit úplné nálevkovité víry se vzduchovým jádrem již při hodnotě zanoření $H = 22$ cm. Nejprve v intervalech 1 až 2 úplné nálevkovité víry za celý měřený interval, které byly doprovázeny víry nižší formy, poté od hodnoty zanoření $H = 14$ cm docházelo v přetváření hladinových vírů přímo na úplné nálevkovité víry se vzduchovým jádrem. Vírové důlky a neúplné nálevkovité víry se již vyskytovaly spíše sporadicky. Se snižující se hodnotou zanoření se zkracovaly intervaly mezi jednotlivými nálevkovitými víry se vzduchovým jádrem a prodlužovala se doba existence daných vírů.



Obrázek 15: Úplný nálevkovitý vír (měření Q22H22)

5.3.2 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 18$ l/s

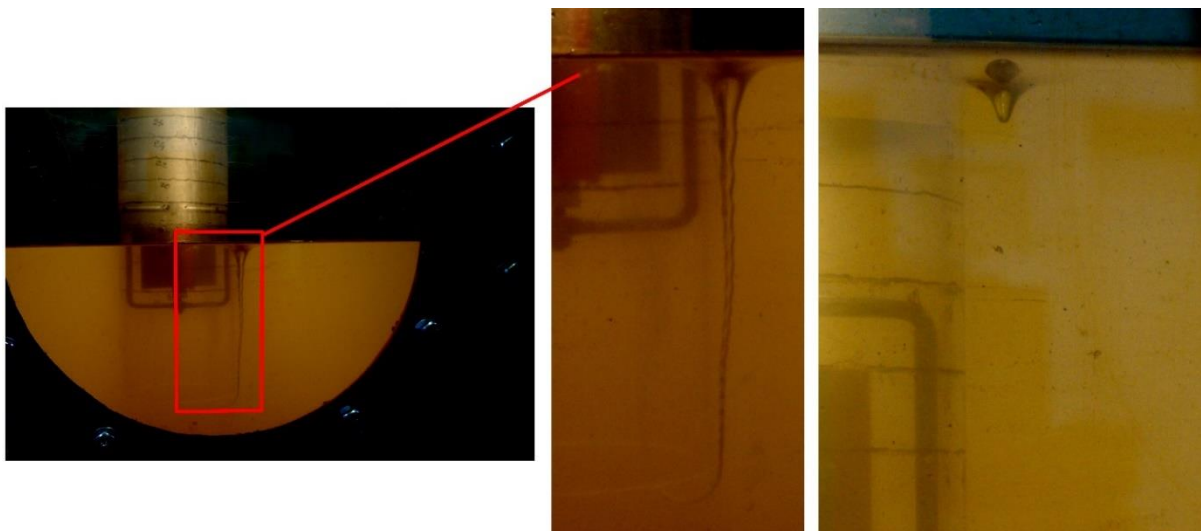
Při průtoku $Q = 18$ l/s docházelo při zanoření $H = 26$ cm k tvorbě hladinových vírů, které se jednou přetvořily v neúplný nálevkovitý vír (obr. 16). Stejný průběh přetrvával až do hodnoty zanoření $H = 18$ cm, kdy se vytvořil první úplný nálevkovitý vír se vzduchovým jádrem, který existoval čtvrtinu měřeného intervalu. Ve zbývajícím čase se vyskytovaly převážně neúplné nálevkovité víry a vírové důlky. Se snižující se hloubkou zanoření se stejně jako v předešlém případě zkracovaly intervaly tvorby úplných nálevkovitých vírů a prodlužovala se doba jejich existence. V poslední fázi zanoření se již nevyskytovaly jiné víry než úplné nálevkovité, které vznikaly přímo z hladinových vírů.



Obrázek 16: Zleva úplný nálevkovitý vír (měření Q18H18), neúplný nálevkovitý vír (měření Q18H26)

5.3.3 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 14$ l/s

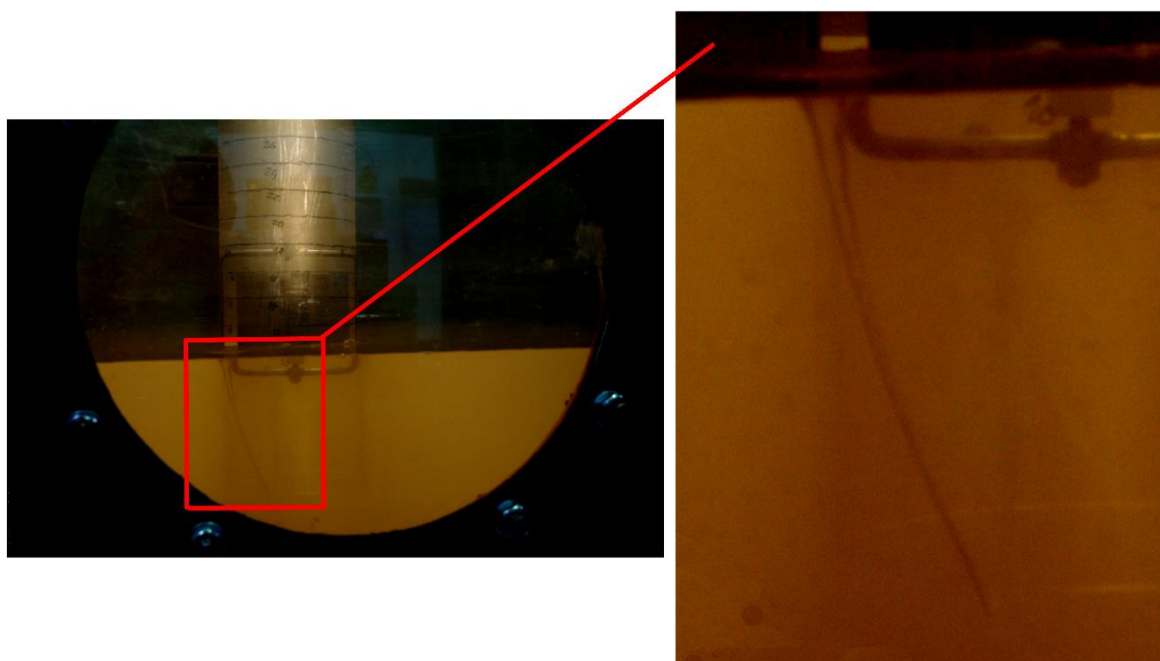
Při průtoku $Q = 14$ l/s převládala při zanoření $H = 26$ cm klidná hladina doprovázená občasnými hladinovými víry. Sporadicky se vyskytovaly i vírové důlky a jednou za dobu měření se vytvořil neúplný nálevkovitý vír. Tento stav přetrvával až do zanoření $H = 18$ cm, kdy byla klidná hladina vystřídána pravidelně se tvořícími hladinovými víry. V kratších intervalech dochází k tvorbě vírových důlků a opět jednou došlo k vytvoření neúplného nálevkovitého víru. Od $H = 14$ cm vznikají úplné nálevkovité víry se vzduchovým jádrem, nejprve za doprovodu vírů nižší formy, poté se tvoří pouze úplné nálevkovité víry se vzduchovým jádrem přímo z hladinových vírů. Opět dochází ke strhávání vírů doprava od sacího potrubí. Zajímavým jevem je, že nedochází k tvorbě neúplných nálevkovitých vírů při zanoření $H = 22$ cm, i přestože při zanoření $H = 26$ cm neboli při situaci příznivější pro tvorbu vírů, se neúplné nálevkovité víry vytvářejí. Předpokládaný důvod je krátký časový interval měření. Můžeme předpokládat, že kdyby byl časový interval měření prodloužen, neúplný nálevkovitý vír by se vyskytoval i při této konfiguraci.



Obrázek 17: Zleva úplný nálevkovitý vír (měření Q14H14), vírový důlek (měření Q14H22)

5.3.4 Vyhodnocení měření pro průtok $Q = 10 \text{ l/s}$

Při průtoku $Q = 10 \text{ l/s}$ a zanoření $H = 26 \text{ cm}$ nedochází ke vzniku vírů, hladina je klidná. Klidná hladina přetrvává i při zanoření $H = 22 \text{ cm}$, kdy se 3x vytvoří hladinové víry. Od $H = 18 \text{ cm}$ dochází již k vytváření prvních vírových důlků (2x za měření interval) a od $H = 14 \text{ cm}$ již lze pozorovat neúplné hladinové víry (1x za měření interval). Při zanoření $H = 10 \text{ cm}$ se vytváří úplný nálevkovitý vír se vzduchovým jádrem, tentokrát na levé straně od vtoku, a je doprovázen hladinovými víry.



Obrázek 18: Úplný nálevkovitý vír (měření Q10H10)

5.4 Srovnání s ostatními autory

Na základě doporučených rovnic od jednotlivých autorů byly dopočítány teoretické hodnoty kritické hloubky ponoru. Autoři zde uvádějí kritickou hloubku ponoru v závislosti na rychlosti proudění či Froudově čísle. Požadované veličiny byly dopočítány z průtoku Q pomocí rovnic (33)(23)(24).

$$Q = vS \rightarrow v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (33)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{Dg}}; Fr^2 = \frac{v^2}{Dg} \quad (23),(24)$$

Dopočítané veličiny byly následně aplikované na rovnice (34)(35)(36)(37)(38):

$$H_c(Rohan) = 1,474v^{0,48}D^{0,76} \quad (34)$$

$$H_c(Gordon) = 0,5432v\sqrt{D} + 0,5D \quad (35)$$

$$H_c(Knauss) = \left(2\frac{v}{\sqrt{gD}} + 0,5\right)D \quad (36)$$

$$H_c(\text{Šulc}) = 1,95D + (0,55Fr^2)D \quad (37)$$

$$H_c(Gulliver) = 0,5D + (0,4Fr)D \quad (38)$$

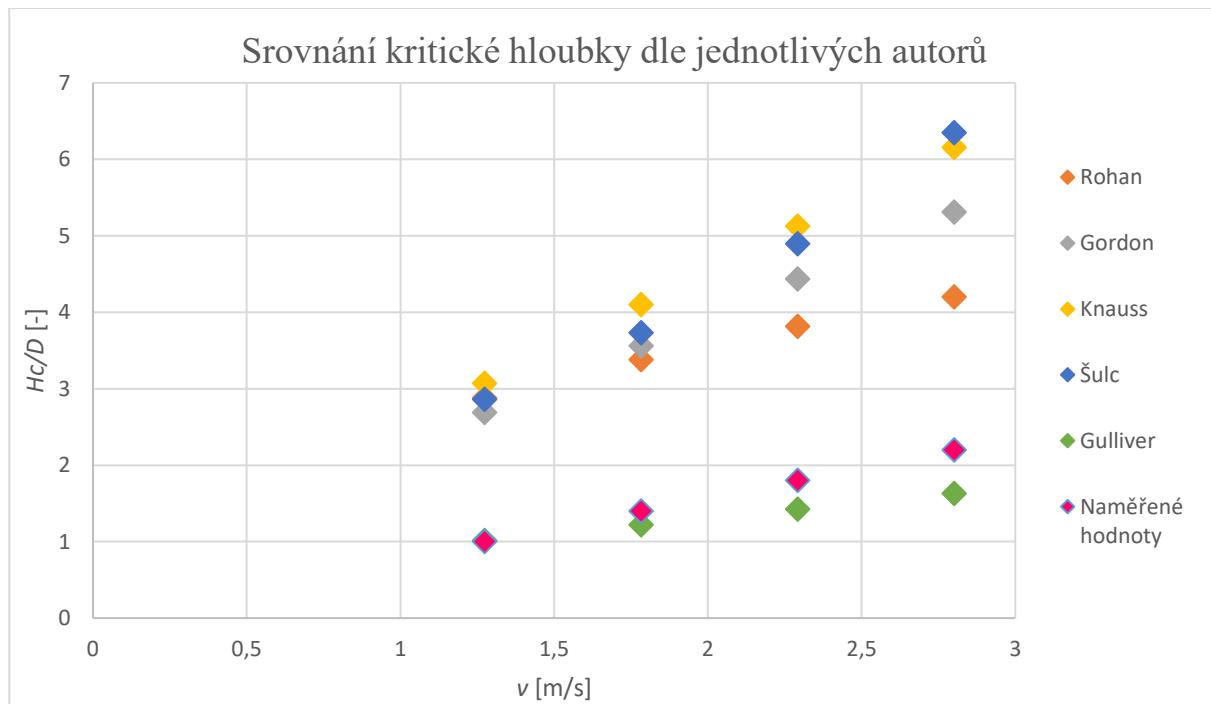
Výsledné hodnoty kritické hloubky ponoru a relativní hloubky ponoru dle jednotlivých autorů lze vidět v tabulkách 4 a 5. Grafickou závislost relativní hloubky ponoru na rychlosti proudění poté na obr. 19.

Q [l/s]	v [m/s]	Fr [-]	Fr^2 [-]	Naměřené		Rohan		Gordon	
				H_c [mm]	H_c/D [-]	H_c [mm]	H_c/D [-]	H_c [mm]	H_c/D [-]
22	2,80	2,83	8,00	220	2,2	420	4,2	531	5,3
18	2,29	2,31	5,35	180	1,8	381	3,8	444	4,4
14	1,78	1,80	3,24	140	1,4	338	3,4	356	3,6
10	1,27	1,29	1,65	100	1	288	2,9	269	2,7

Tabulka 4: Přehled vypočtených hodnot kritické hloubky ponoru a relativní hloubky ponoru

Q [l/s]	v [m/s]	Fr [-]	Fr^2 [-]	Knauss		Šulc		Gulliver	
				H_c [mm]	H_c/D [-]	H_c [mm]	H_c/D [-]	H_c [mm]	H_c/D [-]
22	2,80	2,83	8,00	616	6,2	635	6,3	163	1,6
18	2,29	2,31	5,35	513	5,1	489	4,9	143	1,4
14	1,78	1,80	3,24	410	4,1	373	3,7	122	1,2
10	1,27	1,29	1,65	307	3,1	286	2,9	101	1,0

Tabulka 5: Přehled vypočtených hodnot kritické hloubky ponoru a relativní hloubky ponoru



Obrázek 19: Srovnání kritické hloubky dle jednotlivých autorů

Pomyslná čára spojující jednotlivé body rozděluje graf na dvě oblasti – levou horní a pravou spodní. Pravá spodní oblast představuje oblast možného vzniku úplného nálevkovitého víru a těmto konfiguracím rychlosti proudění a hloubky zanoření je doporučeno se vyvarovat. Levá horní oblast představuje oblast, ve které by nemělo k tvorbě úplných nálevkovitých vírů docházet, nicméně z experimentu je patrné, že tvorba vírů je značně stochastický jev, a proto je doporučeno s ohledem na bezpečnost se konfiguracím blízkým pomyslné čáře vyvarovat.

Z grafického znázornění je patrné, že naměřené hodnoty se nejvíce blíží závislosti odvozené Gulliverem, kdy se dokonce pro rychlost $v = 1,27$ m/s výsledné hodnoty relativní hloubky ponoru shodují. Naměřené hodnoty mají rychleji rostoucí tendenci než hodnoty podle Gullivera.

Mezi naměřenými hodnotami a teoretickými hodnotami podle zbylých autorů byl zaznamenán značný rozdíl, kdy se hodnoty kritické hloubky ponoru liší až o 40 cm. Zvláště hodnoty spočítané podle Šulce a Knausse nabývají jiných velikostí a mají značně rychleji rostoucí tendenci. Teoretické hodnoty podle Rohana nabývají sice jiných velikostí, ale charakter růstu je téměř totožný s naměřenými hodnotami, kdy se odchylka ve všech situacích blíží 20 cm.

Vzhledem k značné komplexnosti vírového proudění je obtížné určit hlavní příčiny odchylek mezi naměřenými a teoretickými hodnotami. Rozdíly může například způsobit způsob přívodu kapaliny do nádrže, kdy při některých konfiguracích odražený proud od zadní stěny interaguje s proudem od přívodu do nádrže a napomáhá tak tvorbě vírů. Dále např. u větších nádrží nedochází připouštění do nádrže k markantnímu „zvlnění“ klidné hladiny apod. Proto je velmi důležité při odhadování kritické hloubky na základě předešlých experimentů zvolit doporučení pro soustavu, která svými charakteristikami co nejbližší odpovídá soustavě, na kterou je odhad prováděn.

6. Závěr

V rámci bakalářské práce byly v rešeršní části shrnuty dosud popsané poznatky v oblasti vírového proudění s důrazem na problematiku vtokových vírů v sací jímce s vertikálně umístěným potrubím. Práce, ze kterých bylo čerpáno, se nejčastěji zabývají teoretickým popisem vzduchového víru, určením zákonů podobnosti proudění v sacích jímkách či popisují konkrétní případy návrhů sacích jímek. Při shromažďování pramenů k rešeršní práci vyšlo najevo, že největší rozvoj v teoretické oblasti vtokových vírů nastal v období 1960–1980. Poté dochází spíše k úpadku, kdy se setkáváme nejčastěji s výzkumy a technickými zprávami pro konkrétní projekty. V poslední době však, s výrazným vývojem výpočetní techniky, dochází k opětovnému obnovení zájmu o složité vírové proudění, neboť nové numerické přístupy umožňují řešení dříve neřešitelných problémů.

Náplní experimentální části bylo ověřování výsledků předchozích autorů, a to konkrétně zkoumání závislosti hloubky zanoření a průtoku na tvorbu úplného nálevkovitého víru se vzduchovým jádrem. Výsledky byly ověřovány na zařízení sestaveném v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana. Rozdíly kritické hloubky ponoru a relativní kritické hloubky ponoru mezi naměřenými hodnotami a teoretickými hodnotami spočítanými podle doporučených vzorců od jednotlivých autorů byly značné. Konkrétně hodnoty relativní hloubky ponoru podle Knausse a Šulce dosahovaly rozdílů až $\Delta H_c/D = 4,1$ a měly rychleji rostoucí tendenci. Hodnoty podle Rohana měly stejnou tendenci růstu, ale rozdíly dosahovaly až $\Delta H_c/D = 2$. Hodnoty podle Gullivera už více odpovídaly naměřeným hodnotám, dokonce se pro $v = 1,27 \text{ ms}^{-1}$ shodovaly.

Důvody značných rozdílů mezi spočítanými teoretickými hodnotami a naměřenými hodnotami lze určit jen obtížně a je možné je rozdělit do několika skupin.

V prvé řadě je třeba si uvědomit, že dosud užívané vztahy závislosti kritické hloubky tvorby úplného nálevkovitého víru jsou vztahy vzniklé statistickým zpracováním empirických měření různých autorů – kde matematický tvar této závislosti je předpokládán, někdy za použití tvarů závislosti vzniklých z teoretických řešení značně zjednodušených modelů (např. potenciálový vír) – a testováním těchto předem předpokládaných vztahů vůči experimentu s tím, že parametry se nejčastěji určují metodami regresního zpracování úlohy s využitím relevantních podobnostních čísel. Takto odvozené vztahy mají ovšem omezenou obecnou platnost, a proto vykazují značné rozdíly mezi sebou již od samého počátku. Rozbor užívaných tvarů těchto semiempirických závislostí a jejich omezení či předpokladů by mohl být samostatným námětem pro studii, jejímž výsledkem by bylo upřesnění kritérií pro užití jednotlivých tvarů závislostí v konkrétních případech.

Na straně druhé, posouzení a vzájemné srovnání výsledků citovaných autorů a vlastního řešení ukazuje, že kromě základní závislosti kritické hloubky tvorby úplného nálevkovitého víru na hloubce zanoření a průtoku do této závislosti vstupují i další podmínky měření. Může jimi být například způsob přívodu vody do soustavy nebo rozměry nádrže, kdy u větších nádrží nedochází k tvorbě vln, které napomáhají vznik vtokových vírů. Zjednodušeně lze říci, že tvorbu vtokových vírů ovlivňují téměř veškeré parametry soustavy, a proto je třeba u používání doporučených rovnic pro kritickou hloubku ponoru dbát zvýšené pozornosti, za jakých podmínek byl daný experiment prováděn. V literatuře se často setkáváme s přebíráním doporučených vzorců, u kterých je poté velmi důležité dohledat konkrétní podmínky, za kterých byly sestaveny, aby nedocházelo k velkým rozdílům oproti skutečným výsledkům. Z tohoto pohledu by bylo zajímavé srovnat detailně i podmínky experimentů jednotlivých autorů, pokusit se najít mezi nimi souvislosti a provést rozbor míry vlivu těchto dalších podmínek na sledovanou kritickou hloubku tvorby úplných nálevkovitých vírů.

Nemalou roli v provedeném měření představuje též opakovatelnost měření a přesnost naměřených hodnot. Mohlo by být přínosné provést příslušné měření se stejným uspořádáním opakovaně (alespoň ještě jednou) i s počtem více měření. Pokud bychom získali obdobnou závislost jako v prvním případě, mohli bychom uvažovat i o testování vlastního závislostního vztahu pro náš uspořádaný experiment a poté provést jeho analýzu vzhledem k ostatním citovaným autorům.

Důležité je též zmínit, že veškeré experimentální výsledky musí být následně ověřeny na skutečném díle. Vlastní zkoumání popsané závislosti je vždy spojeno s přímou či nepřímou aplikací na díle, často na díle konkrétním. Dílo samo bývá často navrhováno s přihlédnutím k závěrům plynoucím z výše popsaných měření a experimentů. Následným ověřením, případně i korekcí vztahů z experimentů pomocí měření na díle, lze dosáhnout toho, že získáme přesnější vztahy a postupy pro navrhování podobného díla v budoucnosti.

Výzkum vírového proudění je bezesporu důležitou oblastí lidského poznání, jak z hlediska technického, tak z hlediska každodenního života při predikci nebezpečných jevů jako jsou například tornáda či hurikány. S ohledem na vývoj výpočetní techniky a s ním spojený rozvoj numerického modelování pomocí CFD softwarů můžeme v následujících letech očekávat velký rozmach v oblasti vírového proudění.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HORÁK, Zdeněk a František KRUPKA. *Fyzika: Příručka pro vysoké školy technického směru (sv. I)*. 2. Praha: SNTL, 1976.
- [2] MATLÁK, J. *Přisávání plynů do proudící kapaliny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.
- [3] Hudec, M. *Optimalizace projektu hydraulických systému z hlediska časové změny parametrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 59 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.
- [4] JÍZDNÝ, M. *Vlastní tvary vírového proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 79s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
- [5] LUGHT, Hans J. *Vortex Flow in Nature and Technology*. United States of America : Wiley & Sons, 1983. 297 s. ISBN 0-471-86925-2
- [6] LAMB, Horace. *Hydrodynamics. Fourth edition*. Cambridge: Cambridge at the university Press, 1916.
- [7] CARRIVAEU, Rupp. *The hydraulic Vortex – an Autocatakinetic System*. International Journal of General Systems. 2006, (35), 707-726.
- [8] ROHAN, K.: *Vodohospodářský časopis: K určování profile lievického víru*. (1966)
- [9] VISCHNER, D. L. a W. H. HAGER. *Dam Hydraulics*. West Sussex, England: John Wiley, 1998. ISBN 978-0471972891.
- [10] AUCKLAND, Adam. *Flow and Hydraulic Efficiency of Vertical Intake Structures*. Ottawa, 2008. Vedoucí práce Dr. Ioan Nistor a Ronald Townsend.
- [11] SKALIČKA, J. *Výzkum proudění s vtokovými víry na zmenšených fyzikálních modelech*. Vodní hospodářství, 1983, roč. 32, č. 1, s. 5-11.
- [12] JOBÁNEK, Stanislav. *Určení bezpečné hloubky ponoru vtoku MVE Vydra 2*. Brno, 2011. 69 s Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
- [13] MÖLLER, Georg. *Vortex-Induced Air Entrainment Rate at Intakes*. Zürich, 2013.
- [14] GULLIVER, John S., A. J. RINDELS a K. C. LINDBLOM. Designing intakes to avoid free-surface vortices. *Water power & Dam Construction*. 1986, , 24-28.
- [15] Anwar, H. O., Amphlett, M. B. Vortices at vertically inverted intake. *Journal of Hydraulic Research*. 1980, (2), 123-134.
- [16] GORBACHEV, S. I., V. A. MAKSIMOVICH a V. O. SARANCHEV. Hybrid modelling of vortex formation at the Boguchany intake. *Hydropower and Dams*. 2007, (3), 64-68.
- [17] ŠULC, J. *Hydraulika*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [18] CUREV, A.: *Vodohospodářský časopis: Strouhalovo číslo jako universální kinematické kritérium podobnosti v hydromechanice* (1978)

[19] ŽAJDLÍK, Miroslav. *Podmienky vzniku vírov*. Bratislava: Výzkumný ústav vodného hospodárstva v Bratislave, 1981.

[20] PACIGA, A., STRÝČEK, O., GANČO, M., VARCHOLA, M. *Vtokové nádrže čerpacích stanic*. Závěrečná zpráva. Bratislava 1976.

Seznam zkratek a symbolů

Veličina	Jednotka	Význam
CFD		computational fluid dynamics
A-A		myšlený řez korytem s otevřenou hladinou
B-B		myšlený řez korytem s otevřenou hladinou
C	$[m^2s^{-1}]$	konstanta
D	$[m]$	průměr vtoku
F	$[Hz]$	frekvence
F	$[N]$	síla
Fr	$[-]$	Froudovo číslo
G	$[ms^{-2}]$	gravitační zrychlení
H	$[m]$	hloubka zanoření vtokového potrubí
H_c	$[m]$	kritická hloubka ponoru
I		jednotkový vektor osy x
J		jednotkový vektor osy y
K		jednotkový vektor osy z
L	$[m]$	délka
N	$[s^{-1}]$	otáčky
M		index označující model
P	$[Pa]$	tlak
Q	$[m^3s^{-1}]$	objemový průtok
r, R	$[m]$	poloměr
r_c	$[m]$	poloměr jádra
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
S	$[m^2]$	plocha
Sh	$[-]$	Strouhalovo číslo
T	$[s]$	čas
T	$[s]$	perioda
U	$[ms^{-1}]$	pravoúhlý průmět rychlosti do osy x
V	$[ms^{-1}]$	pravoúhlý průmět rychlosti do osy y
v	$[ms^{-1}]$	rychlost
v_0	$[ms^{-1}]$	tangenciální rychlost na hladině kapaliny
V	$[m^3]$	objem
W	$[ms^{-1}]$	pravoúhlý průmět rychlosti do osy z
We	$[-]$	Weberovo číslo
x		osa pravoúhlého systému
y		osa pravoúhlého systému
z		osa pravoúhlého systému
β	$[-]$	objemový obsah vzduchu
Γ	$[m^2s^{-1}]$	cirkulace rychlosti
ϱ	$[m]$	charakteristická délka
σ		křivka ohraničující uzavřenou plochu S
ϑ	$[Nsm^{-2}]$	dynamická viskozita

λ	[-]	měřítko podobnosti
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ξ	[-]	součinitel souměrnosti
π	[-]	Ludolphovo číslo
ρ	[kgm ⁻³]	hustota
σ	[Jm ⁻²]	povrchové napětí
ω	[rads ⁻¹]	úhlová rychlost
$\vec{\omega}$	[s ⁻¹]	vektor vířivosti rychlostního pole

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zleva proudnice, proudová trubice	11
Obrázek 2: Sily v kapalině.....	12
Obrázek 3: Průběh rychlosti a vířivosti Rankinova víru	16
Obrázek 4: Průběh rychlostí pro jednotlivé modely vírů	16
Obrázek 5: Schéma vzniku vtokových vírů.....	18
Obrázek 6: Zobrazení hladinového a dnového víru.....	18
Obrázek 7: Stádia vtokových vírů	20
Obrázek 8: Schéma vzniku vtokového víru v závislosti na hloubce ponoru.....	21
Obrázek 9: Závislost kritické hloubky na Froudově čísle	22
Obrázek 10: Experimentální zařízení (pohled shora)	27
Obrázek 11: Experimentální zařízení (pohled na čerpadlo)	28
Obrázek 12: Schéma měřicího okruhu, náčrt půdorysového pohledu horní nádrže.....	28
Obrázek 13: Přehled jednotlivých typů vírů pozorovaných na experimentálním zařízení.....	29
Obrázek 14: Dva nálevkovité víry s úplným vzduchovým jádrem (měření H14Q22).....	31
Obrázek 15: Úplný nálevkovitý vír (měření Q22H22).....	31
Obrázek 16: Úplný nálevkovitý vír, neúplný nálevkovitý vír	32
Obrázek 17: Zleva úplný nálevkovitý vír, vírový důlek (měření Q14H22)	33
Obrázek 18: Úplný nálevkovitý vír (měření Q10H10).....	33
Obrázek 19: Srovnání kritické hloubky dle jednotlivých autorů.....	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled nejběžnějších v přírodě se vyskytujících vírů	13
Tabulka 2: Vztahy pro výpočet kritické hloubky podle jednotlivých autorů	22
Tabulka 3: Přehled nejvyšší formy víru pro jednotlivá měření	30
Tabulka 4: Přehled kritické hloubky ponoru a relativní hloubky ponoru.....	34
Tabulka 5: Přehled kritické hloubky ponoru a relativní hloubky ponoru.....	34